コンピュータネットワークを介したテレオペレーション

正員 小 菅 一 弘 (東北大学)

非会員 村 山 英 之 (東北大学)

Teleoperation via Computer Network

Kazuhiro Kosuge, Member, Hideyuki Murayama, Non-member (Tohoku University)

In a teleoperation system, providing force information to a human operator can improve task performance. When a communication block between a master and a slave has transmission delay, the system is easily destabilized. Anderson and Spong guaranteed passivity in the communication block by using scattering transformation and overcame this instability caused by the time delay. But this method can be applied to the communication block with constant time delay. In traditional teleoperation system, its communication block has constant time delay. But time delay irregularly changes in a computer network because many users share telecommunication lines. This paper shows that the variable time delay destabilizes bilateral master slave manipulator with scattering transformation and a new compensation method which keeps the time delay constant. This new compensation method has been implemented in a single axis master slave manipulator.

キーワード：コンピュータネットワーク，ロボット，遠隔操作，バイラテラルフィードバック，通信遅れ

1. はじめに

テレオペレーションは、マスタの位置、速度といった運動の情報を遠隔地のスレーブ側へ送信し、スレーブの動作によって作業を行うものである。従来のテレオペレーションシステムでは、宇宙空間などの危険な環境下で作業することを想定していたため、マスタとスレーブの間の通信部は、通信衛星、専用通信ケーブル、専用無線といった専用の通信回線によって構成されていた。

しかし、近年のインターネット、情報スーパーハイウェイ計画などの情報インフラストラクチャの発展により、通信衛星などの専用の通信回線に比べて比較的手軽で安価といった理由から、コンピュータネットワークを介して遠隔作業を行うことが注目されている。

専用の通信回線を用いる場合には、通信条件は時間的にはば一定であるとみなせる。しかし、コンピュータネットワークでは次のような点が専用の通信回線とは異なる(図1)。

- 多数のユーザにより共有されており、通信負荷は不規則に変化する。
- 多数のコンピュータやネットワーク上の機器などを経由する。
- データがパケットやセルなどの単位へ分解、復元される。また、データの圧縮、伸張などが行われる。

- 伝送エラーの発生時には、自動的にデータの再送などが行われる。

以上のような理由から、ネットワークにおいては通信条件は時間的に一定ではない。本論文では、このようなネットワークを介したテレオペレーションシステムにおける新たな問題点を指摘し、その解決策を提案する。

図1 ネットワークを介したテレオペレーションシステム

Fig.1. Teleoperation system via computer network

2. バイラテラル制御と通信遅れ

テレオペレーションシステムで遠隔作業を行う場合、スレーブの力覚をオペレータが感じることができず、非常に作業しにくいことが知られている。そこで、スレーブ側からマスタ側へ力覚情報のフィードバックを行うのが、バイラテラル制御である。

テレオペレーションにおける問題として、マスタとスレーブ間の通信の遅れの問題がある。通信遅れのある通信部を介して速度情報と力情報を送信して、マスタスレーブ系のバイラテラル制御を行った場合、わずかな通信遅れが原因となってシステム全体が不安定になることがある。

そこで、AndersonとSpong⁽¹⁾は、Scattering変換を用いて安定な制御系を構成する方法を提案している。この方法では、通信部はマスタとスレーブ間のどちら向きに送信しても同じ一定の通信遅れをもつ、時不変のむだ時間系であると仮定している。このような通信遅れを有するマスタスレーブ系において、通信部が速度と力について受動性を満たすようにScattering変換を用いて補償することにより、通信遅れのあるシステム全体の安定性を保証している。

3. ネットワークにおける通信遅れ

通信部がネットワークの場合には、1節で示したような理由から通信部は向きによって遅れ時間が異なる上に、通信条件により通信遅れは動的に変化すると考えられる。そこで、実際にテレオペレーションの実験を行うネットワーク上で、この通信遅れの測定を行った。

実験を行うネットワーク環境は、図2のような10BASEのイーサネットではデータの最大伝送速度は10 Mbit/sである。マスタアーム、スレーブアームは、それぞれリアルタイムOS VxWorksを用いる制御コンピュータ(CPU モトローラ68040 25MHz/ 33MHz)によって制御される。このネットワーク上には、VxWorksが数台とホストとしてUNIXワークステーションが1台接続されている。

VxWorksはUNIX 4.3 BSD完全互換のネットワーク機能をもっており、マスタスレーブ間の通信にはUNIXワークステーションとも通信可能なストリーム型ソケットを用いる。

図2 実験を行うネットワーク環境

Fig.2. Network environment

(a) スレーブからマスタへ Slave to master

(b) マスタからスレーブへ Master to slave

図3 ネットワークの通信遅れ

Fig.3. Time delay on computer network

このネットワーク上で、マスタスレーブ間をワークステーションで中継して2 msおきに10バイトのデータを伝送した場合の、通信遅れを測定した結果が図3である。これを見ると、通信遅れは0 sから0.94 s程度の間で不規則に変化し、向きにより遅れは異なっていることがわかる。図4にこの通信遅れのヒストグラムを示す。

4. 通信遅れの変化による影響

通信遅れが一定の場合には、図5に示すように一定の周期で送信されたデータは、ある一定の遅れをもって送信時と同じ一定の周期で受信される。これに対して、通信遅れが変化する場合には、送信側で一定の周期でサンプリングされたデータであっても、受信側は一定の周期ではなく不規則に変化する周期で受けとることになり、図5に示すように、短い周期でまとめてデータが受信される場合や、長い時間にわたってデータが受信されない場合がある。つまり、通信遅れが一定の場合には、通信部では位相遅れが起こるに過ぎないが、通信遅れが変化する場合には信号の波形の変化が起こる。

したがって、通信遅れが動的に変化する通信部は、時不変のむだ時間系とはみなせず時変システムとなる。このため、通信部を時不変のむだ時間系と仮定しているScattering変換をそのまま用いても、通信部の受動性が保証されない。

5. 通信遅れが変化するマスタスレーブ系

前節で述べたような理由から、ネットワークを介した場合には通信遅れ時間の時間的な変化速度が大きくなるため、Scattering変換を用いてもシステムが不安定になることが考えられる。そこで、横小路⁽²⁾らと同様のモデルを用いて、通

(a) スレーブからマスタへ Slave to master

(b) マスタからスレーブへ Master to slave

図4 通信遅れのヒストグラム

Fig.4. Histogram of time delay

信遅れ時間が動的に変動する通信部を介したバイラテラルマスタスレーブ系の数値シミュレーションを行った。

まず、1自由度のマスタスレーブ系を図6のようにモデル化する。マスタおよびスレーブアームの動特性を次式で与える。

$$\tau_m + f_h = m_m \ddot{x}_m + b_m \dot{x}_m \quad (1)$$

$$\tau_s - f_e = m_s \ddot{x}_s + b_s \dot{x}_s \quad (2)$$

ここで、 x_m 、 x_s は、アームの変位であり、 m_m 、 m_s 、 b_m 、 b_s はそれぞれアームの質量、粘性係数である。また、 f_h は、オペレータがマスタアームに加える力であり、 f_s は、スレーブアームが対象物に加える力である。 τ_m 、 τ_s は、アクチュエータ駆動力である。

対象物のダイナミクスは次式のような線形モデルで与えられるものとする。

$$f_e = m_w \ddot{x}_s + b_w \dot{x}_s + c_w x_s \quad (3)$$

m_w 、 b_w 、 c_w は対象物の質量、粘性係数、バネ係数である。オペレータの動特性を次式で与える。

$$\tau_{op} - f_h = m_{op} \ddot{x}_m + b_{op} \dot{x}_m + c_{op} x_m \quad (4)$$

m_{op} 、 b_{op} 、 c_{op} は、オペレータの腕の質量、粘性係数、バネ係数である。また、 τ_{op} は、オペレータの筋の合力である。アクチュエータの駆動力は、Andersonら⁽¹⁾の制御則を用いて次式で与える。

$$\tau_m = -B_m \dot{x}_m - f_{md} \quad (5)$$

$$\tau_s = -B_s \dot{x}_s + f_s - \alpha f_e \quad (6)$$

図5 通信遅れが変化するときの伝送データ

Fig.5. Transmission data with variable time delay

ここで、 f_s はスレーブの運動をマスタに追従させる調整力であり次のように与えられ、この力をマスタ側へ力情報 f_{md} として返す。

$$f_s = K_s \int^t (\dot{x}_{sd} - \dot{x}_s) dt + D_s (\dot{x}_{sd} - \dot{x}_s) \quad (7)$$

$\dot{x}_{sd}$ はスレーブ側が受信するマスタの速度で、 f_{md} はマスタ側が受信する力情報 f_s である。これらは通信遅れ時間 $T(t)$ をとともなうが、Scattering変換を用いて次のように補償する。
(1) (4)

$$\dot{x}_{sd}(t) = \frac{1}{b} \{ b \dot{x}_m(t-T) + f_{md}(t-T) - f_s(t) \} \quad (8)$$

$$f_{md}(t) = f_s(t-T) - b \dot{x}_{sd}(t-T) + b \dot{x}_m(t) \quad (9)$$

ここで、 b は伝送線路の特性インピーダンスである。

以上の制御則を用いて、通信遅れ時間 T が0.6s一定の場合と、遅れ時間の変化速度が最も大きくなるケースとして、遅れ時間 T が1sごとに0.2sから0.5sの間で方形波状に動的に変化する場合についてシミュレーションを行った。ここでは、遅れ時間はマスタスレーブ間のどちら向きでも同じ

図6 1自由度のマスタスレーブ系のモデル

Fig.6. Model of single DOF master slave system

であるとしている。また、入力 τ_{op} として $t > 1$ sで $\tau_{op}=10$ Nなるステップ入力を与えた。また、オペレータ、マスタ、スレーブ、対象物のインピーダンス特性は次の表1のように与え、アクチュエータ駆動力のパラメータとScattering変換の特性インピーダンス b は表2のように与えた。

このシミュレーションの結果が図7である。これをみると、遅れ時間が一定の場合には運動は安定しているが、遅れ時間が変化する場合には、Scattering変換を用いても運動が不安定になることがわかる。

表1 インピーダンス特性
Table 1. Impedance parameter

特性	オペレータ	マスタ,スレーブ	対象物
質量 [kg]	1.0	2.0	3.0
粘性係数 [N/(m/s)]	2.0	0.2	1.0
バネ係数 [N/m]	10.0	0.0	100.0

表2 アクチュエータ駆動力 τ_m, τ_s のパラメータ

Table 2. Parameter of actuator force

K_s [N/m]	240.0
D_s [N/(m/s)]	35.0
B_m [N/(m/s)]	35.5
B_s [N/(m/s)]	0.0
α_f	0.6
b [N/(m/s)]	35.5

6. 通信遅れの補償

<6.1> 変化する通信遅れの補償 この通信遅れの変化により不安定になる問題を解決するために、遅れ時間の変化を次のように補償することを考える。

まず、マスタとスレーブ間の通信の遅れ時間の最大値 T_c を測定しておく。そして、図8に示すように、一定周期でサンプリングされた速度情報や力情報に、サンプリング時刻 t_{send} を付加して送信する。最大の遅れ時間 T_c よりも短い遅れ時間 $t - t_{send}$ で受信されたデータは、受信側のFIFOバッファでバッファリングしておく。そして、付加されたサンプリング時刻 t_{send} に基づいて、最大の遅れ時間 T_c まで待って各アームに指令する。

実際にこの補償方法を実現する際には、ストリームソケットでは順序性が保証されていることを利用して、FIFOバッファとしてソケットそのものを用いる。すなわち、受信側に到着したデータでバッファリングしなくてはならない分は、ソケットから読み出さずにソケット内に蓄えておく。この遅れ時間の変化の補償を実現するフローチャートを図9に示す。実際の実現方法は次のようになる。

各マニピュレータを制御する制御プログラムは、時刻を刻む時計タスク、実際のマニピュレータの関節角を読み込み

(a) 通信遅れ一定 Constant time delay 0.6s

(b) 通信遅れが変化 Variable time delay 0.2s to 0.5s

図7 アームの運動(シミュレーション)

Fig.7. Position of arm (simulation)

制御するマニピュレータ制御タスク、そして、通信路であるストリームソケットからデータを読み込む通信受信タスクから成る。まず、通信受信タスクは、相手側の制御タスクからソケットを介して送られてきたデータを読み込む。このデータには、相手側で送信された時刻 t_{send} が付加されている。この後、時計タスクから現在の時刻を得て、送られてきたデータの通信遅れが設定しているみかけの通信遅れ T_c 以上になったら、その指令値をマニピュレータ制御タスクに指令する。

これにより、みかけの通信の遅れ時間を設定した一定の値 T_c にすることができるため、Scattering変換を用いることで通信部の安定性が保証されることになる。通信部全体のシステム構成は図10に示すようになる。ソケットによるデータの伝送では通信遅れは不規則に変化するが、マスタ側、スレーブ側両方で、受信時に通信遅れの変化を補償することで、ソケットを送信してから各アームへ指令するまでの遅れ時間は常に一定に保たれる。

<6.2> みかけの通信遅れ時間 T_c の決定 ここで、先の遅れ時間の計測結果(図3、図4)によると、通信の遅れ時間は、スレーブからマスタへ送る向きでは、0 sから0.705 sの間で不規則に変化するが、0.495 s以上になる割合は5%以下である。マスタからスレーブへ送る向きでも、0 sから0.934 sの間で不規則に変化するが、0.717 s以上になるのは5%以下である。これからわかるように、遅れ時間が最大遅れ時間程度に達する可能性はごくわずかに過ぎないことがわかる。また、実際のネットワーク環境では遅れ時間が長くなる現象は、突発的に発生することが多く、ごく短時間で以前の短い遅れ時間に戻る。

図10 補償システムを含む通信部
Fig.10. Communication block with compensation system

図8 通信遅れ補償システムの構造
Fig.8. Structure of compensation system

そこで、通信遅れ時間の95%以上が含まれる遅れ時間を、みかけの遅れ時間として設定することが考えられる。この設定したみかけの遅れ時間よりも遅れるケースもありうるが、その割合は5%程度と小さいため、その際には1つ前のサンプリングでの値を指令することにする。このようにした場合には、マスタスレーブ間で送受信される速度情報と力覚情報のうち、5%が欠落しているのと同様と考えられる。この後の実験結果で示すようなテレオペレーション実験を、実際に繰り返し行ってみた結果では、みかけの通信遅れ時間を95%以上が含まれる遅れ時間に選べば影響はほとんどなく、実用上は問題ないことがわかっている。

<6-3> 通信条件に応じてみかけの遅れ時間を設定する
ネットワークの通信遅れの変化は、先のような突発的なものばかりでない。考えられるのは、ネットワークの通信負荷の増大にともなって、遅れ時間が長くなる現象がある程度の時間にわたってつづく場合である。

そこで、ネットワークの状況の変化によって通信遅れ時間が長くなるのに応じて、設定するみかけの遅れ時間を長く

することが考えられる。この際に、マスタスレーブ間の両方の向きの遅れ時間を同じにするために、図10に示すようにマスタ側とスレーブ側双方の設定するみかけの遅れ時間をお互いに送り合うことにする。みかけの遅れ時間は、それまでの最大の遅れ時間に設定することにする。この方法を実現するフローチャートを図9に示す。実際の実現方法は次のようになる。

通信受信タスクが、相手側の制御タスクからデータを読み込んだ後に、相手側の通信受信タスクが設定しているみかけの通信遅れ T_{cm} を読み込む。その後、読み込んだデータの通信遅れ t_{send} 、こちら側が設定しているみかけの通信遅れ T_c 、相手側が設定しているみかけの通信遅れ T_{cm} を比較し、この中の最大の値を、新たにこちら側のみかけの通信遅れ T_c として設定する。その後、指令値をマニピュレータ制御タスクに指令した後に、こちら側が設定しているみかけの通信遅れ T_c を相手側の通信受信タスクへ向けて、ソケットを介して送信する。

通信部全体のシステム構成は図10に示すようになる。ソケットによるデータの伝送では通信遅れは不規則に変化するが、マスタ側の通信遅れ変化の補償器となる通信受信タスクは、自らが設定しているマスタ側のみかけの遅れ時間 T_{cm} を、ソケットを使ってスレーブ側の補償器へ送信している。同様に、スレーブ側の補償器も、自らが設定しているスレーブ側のみかけの遅れ時間 T_{cs} を、ソケットを使ってマスタ側の補償器へ送信している。これにより、各補償器はお互い相手側が設定しているみかけの遅れ時間を知ることができるため、マスタからスレーブへの向きと、スレーブからマスタへの向きの通信遅れが常に同じになるように保つことができる。

7. マスタアームとスレーブアームの制御系構成

これまでに示した通信遅れの補償を用いて、実際に1自由度のバイラテラルマスタスレーブ系を構成する。

実際のアームは、摩擦などの影響により先のシミュレーションのモデルとは一致しないので、何らかの方法で次のようなみかけのインピーダンス特性をもつように、各アーム

図9 通信遅れ補償のフローチャート

Fig.9. Flow chart of compensation

ムを制御することを考える。

$$M\ddot{x}_m + D\dot{x}_m = f_h - f_{md} \quad (10)$$

$$M\ddot{x}_s + D\dot{x}_s = f_s - f_e \quad (11)$$

f_h : オペレータがマスタアームに加える操作力

f_{md} : マスタ側がスレーブ側から受けとる力情報

f_s : スレーブの運動をマスタに追従させる調整力

f_e : スレーブアームが環境に与える力

ここで、調整力 f_s は先の式(7)のように与える。また、速度と力は先のScattering変換(式(8),式(9))を用いて補償する。

なお、ここではその制御の方法として、小菅ら⁽³⁾⁽⁴⁾の仮想内部モデルによるインピーダンス制御を用いた。

8. 実験結果

これまでに示した通信遅れの補償を用いて、実際に1自由度のテレオペレーションシステムで実験を行う。ネットワーク環境は、先の3節でのネットワークにおける通信遅れ時間の測定時と同様である。各アームのサーボ周期は2 ms とし、速度情報と力情報も同じ2 msおきに送信している。各

図11 各アームのインピーダンスモデル

Fig.11. Impedance model

アームに持たせるインピーダンス特性は、質量 $M=13[\text{kg}]$ 、粘性係数 $D=30[\text{N}/(\text{m}/\text{s})]$ と与え、調整力 f_s のパラメータは、 $K_s=870[\text{N}/\text{m}]$ 、 $D_s=54[\text{N}/(\text{m}/\text{s})]$ と与える。Scattering変換の特性インピーダンスは、 $b=63[\text{N}/(\text{m}/\text{s})]$ とした。

まず、通信遅れ時間の95%以上が含まれる遅れ時間を、みかけの通信遅れ時間とした場合の実験結果が図12である。みかけの通信遅れ時間は0.718 sに設定している。これを見ると、スレーブが環境に拘束されてもアームの運動は安定していることがわかる。

通信の遅れは、大部分の時間で0.718 sの一定値に保たれている。一時的にこれよりも遅れ時間が長くなることがあるが、5%以下とわずかであり実際のマニピュレータの運動にはほとんど影響しないことがわかる。実際に別のいくつかの実験条件で、これと同様の95%以上が含まれる遅れ時間をみかけの通信遅れ時間とした場合の実験を行った結果でも影響はほとんどなく、実用上は問題ないことがわかった。

次に、ネットワークの通信条件の変化に応じて、みかけの遅れ時間を設定した場合の実験結果が図13である。通信遅れ時間を見ると、通信条件に応じて遅れ時間が長くなっていくが、マスタスレーブ間で、お互いに設定しているみかけの遅れ時間を送り合っているため、どちら向きの通信遅れ時間もほぼ同じになっていることがわかる。

9. おわりに

ネットワークを介したテレオペレーションシステムにおいて、新たに生じる問題点として、通信の遅れ時間が不規則に変化する点を指摘した。この通信遅れ時間の変化速度が大きい場合には、Scattering変換を用いてもシステムが不安定になることを示した。

この問題の解決策の第一歩として、みかけの通信遅れ時間が一定になるように遅れ時間を補償し、Scattering変換を用いることによって安定性を保証することを提案した。さらに、一時的な通信負荷の増大にともなう遅れ時間の増大に対応して、みかけの遅れ時間を設定することを提案した。そして、実験により提案したシステムの有効性を示した。

なお本研究は、平成7年度文部省科学研究費補助金一般研究(C)(07650304)の援助を受けて行われている研究の一部である。

(平成8年10月8日受付)

(a) アームの運動 Position of arm

(b) アームに加わる接触力 Contact force

(c) 通信遅れ Time delay

図12 通信遅れ補償のある場合(通信遅れ 0.718s)

Fig.12. with time delay compensation (time delay 0.718s)

(a) アームの運動 Position of arm

(b) アームに加わる接触力 Contact force

(c) 通信遅れ Time delay

図13 通信負荷の増大に対応した場合

Fig.13. Adapt to an increase in traffic

文 献

- (1) Robert J. Anderson, Mark W. Spong: "Bilateral Control of Telemanipulators with Time Delay", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.34, No.5, 494~501 (1989)
- (2) Yasuyoshi Yokokohji: "Bilateral Control of Master-Slave Manipulators for Idel Kinesthetic Coupling —Formulation and Experiment", IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.10, No.5, pp.605-619 (1994).
- (3) 小菅一弘, 古田勝久, 横山竜昭: 「ロボットの仮想内部モデル追従制御系—メカニカル・インピーダンス制御への応用—」, 計測制御学会論文集, 第24巻, 第1号, 55~62 (1988)
- (4) K. Kosuge, T. Itoh, T. Fukuda: "Scaled Telemanipulation with Time delay", Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2019~2024 (1996)
- (5) 小菅一弘, 村山英之, 竹尾光治: 「コミュニケーションネットワークを介したバイラテラルテレオペレーションシステム」, 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 第13回, No.3, 761~762 (1995)
- (6) K. Kosuge, H. Murayama, K. Takeo: "Bilateral Feedback Control of Telemanipulators via Computer Network", Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS'96 (1996)

- (7) 小菅一弘, 伊藤友孝, 福田敏男: 「通信遅れを有するスケールドテレマニピュレータの制御」, 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 第13回, No.3, 759~760 (1995)
- (8) 横小路泰義, 吉川恒夫: 「理想的な筋運動感覚を与えるマスター・スレーブマニピュレータのバイラテラル制御」, 計測自動制御学会論文集, 第27巻, 第1号, 56~63 (1991)

小 菅 一 弘

(正員) 1955年10月2日生。1980年東京工業大学大学院修士課程修了。日本電装(株)を経て、1982年東京工業大学工学部助手、1990年名古屋大学工学部機械情報システム工学科助教授を経て、1995年3月より東北大学工学部機械知能工学科教授、現在に至る。1989-1990年MIT機械工学科客員研究員。工博。ロボット、知能機械などの研究に従事。

村 山 英 之

(非会員) 1971年3月2日生。1995年3月東北大学工学部機械電子工学科卒業。同年4月同大学大学院工学研究科機械電子工学専攻修士課程入学。現在に至る。コンピュータネットワークを介した遠隔操作システムの研究に従事。日本ロボット学会学生会員