

マニュアル操作型 Networked Robot

Manually Operated Networked Robot

小菅一弘*, ○村山英之**, 竹尾光治***

Kazuhiro KOSUGE*, ○Hideyuki MURAYAMA**, Koji TAKEO***

*東北大学, **東北大学大学院, ***東北大学

*Tohoku University, **Tohoku University, ***Tohoku University

キーワード: コンピュータネットワーク (computer network), バイラテラルテレオペレーション (bilateral teleoperation), 通信遅れ (communication delay), ロボット (robot)

連絡先: 〒980-77 仙台市青葉区 荒巻字青葉 東北大学工学部 機械知能工学科 ロボット工学講座 小菅研究室
村山英之, Tel.: (022)217-6917, Fax.: (022)217-6917, E-mail: murayama@irs.mech.tohoku.ac.jp

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を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ほぼ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。

- 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し、伝送経路は定まっていない。
- データがパケット、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なわれる。

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。

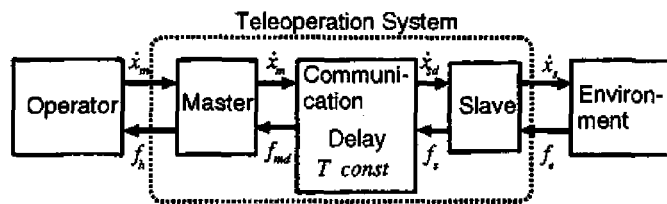


Fig. 1 Structure of traditional teleoperation system

2. バイラテラルテレオペレーションシステム

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ないと、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なうのが、バイラテラルテレオペレーションである。バイラテラル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、バイラテラルマスタスレーブ系を構成した場合、わずかな通信遅れが原因となってシステムが不安定になることがある。

そこで、AndersonとSpong¹⁾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、通信部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、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なうネットワー

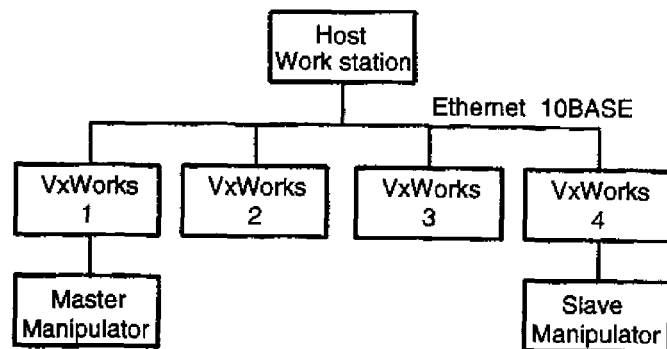


Fig. 2 Network environment

ク上で、この通信遅れの測定を行なった。

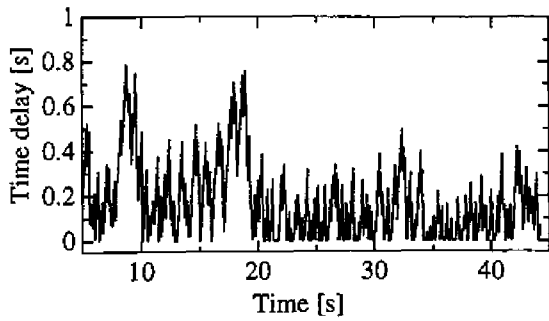
実験を行なうネットワーク環境は、Fig.2のような10BASEのイーサネットである。マスタマニピュレータ、スレーブマニピュレータは、それぞれリアルタイムOS VxWorksを用いる制御コンピュータ(CPU モトローラ68040 25MHz, 33MHz)によって制御される。このネットワーク上には、VxWorksが数台、およびホストとしてUNIXワークステーションが1台接続されている。

VxWorksはUNIX 4.3 BSD完全互換のネットワーク機能を持っており、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。

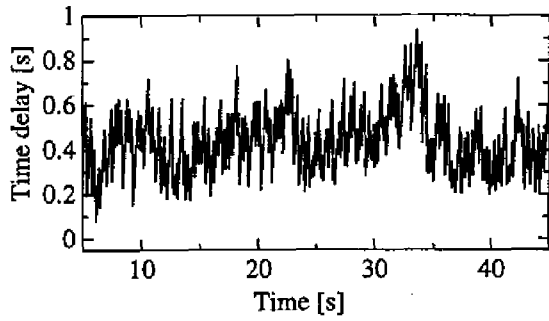
このネットワーク上で、マスタスレーブ間でワークステーションで中継して2[ms]おきに10バイトのデータを送信した場合の、通信遅れを測定した結果がFig.3である。これを見ると、通信遅れは0[s]から0.94[s]程度の間で不規則に変化し、向きにより遅れは異なっていることがわかる。Fig.4にこの通信遅れのヒストグラムを示す。

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Fig.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



(a) Slave to master



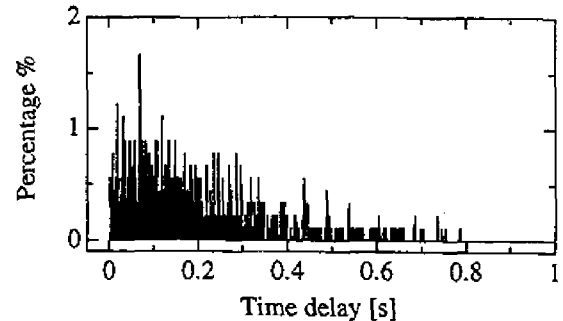
(b) Master to slave

Fig. 3 Time delay on computer network

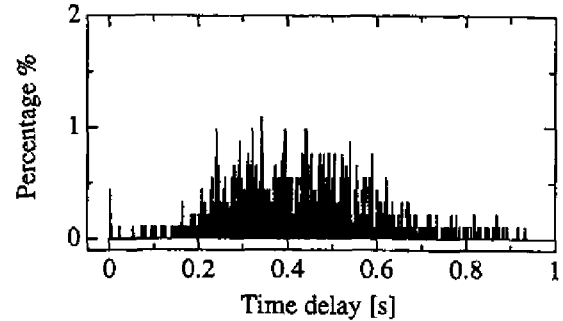
で一定の周期でサンプリングされたデータであっても、受信側は一定の周期ではなく不規則に変化する周期で受けとることになり、Fig.5に示すように、短い周期でまとめてデータが受信される場合や、長い時間にわたってデータが受信されない場合がある。

このような通信遅れの変化する通信部の例として、Fig.6に示すようなある時刻で遅れ時間が T から $T-dT$ に変化する通信部を考える。このような通信部を介してデータを送信した場合、Fig.6に示すような出力波形の変化が起こる。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周波数さえも変化することになる。

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、通信部の安定性が保証されない。



(a) Slave to master



(b) Master to slave

Fig. 4 Histogram of time delay (magnification)

5. 通信遅れが変化するバイラテラルマスタスレーブ系

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、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次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。

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

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

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_m 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へ加える力

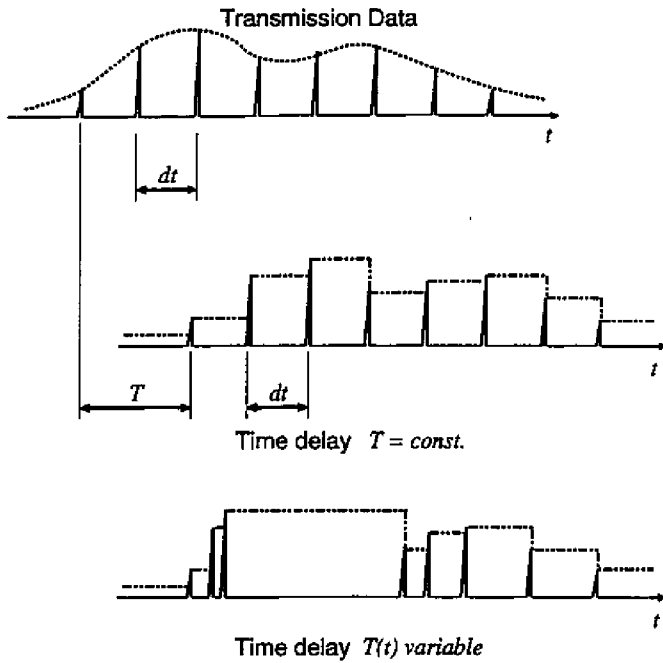


Fig. 5 Transmission data with variable time delay

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。

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

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。

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

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

ここで、 f_s は、マスタとスレーブ間の運動を一致させる調整力で、次のように与える。

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

\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スレーブ側から返される調整

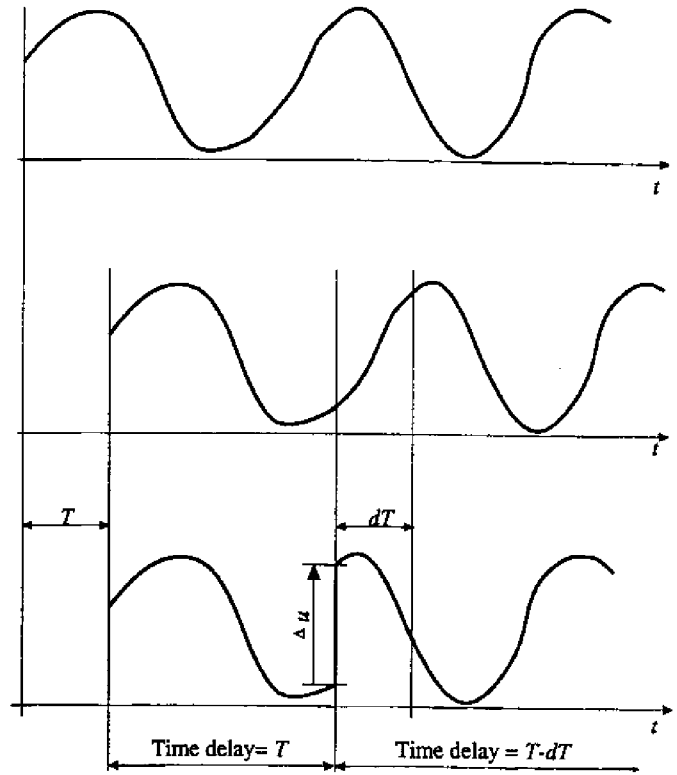


Fig. 6 Wave form with variable time delay

力 f_s である。これらは遅れ時間を $T(t)$ をともなが²⁾、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、遅れ時間 T が 0.6[s] 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 1[s] ごとに 0.2[s] から 0.5[s] の

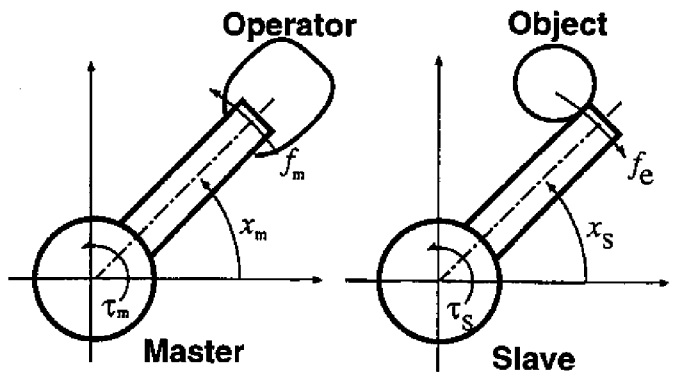


Fig. 7 Single DOF master slave manipulator

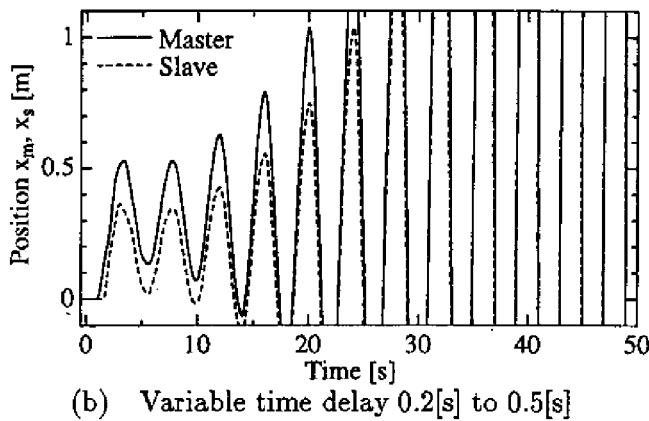
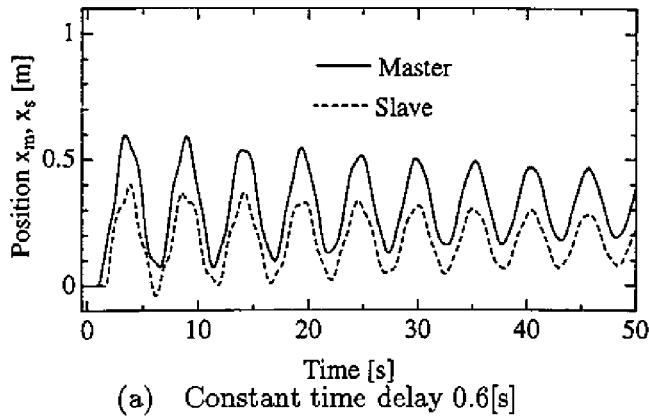


Fig. 8 Position of arm (simulation)

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、遅れ時間はマスター・スレーブ間のどちら向きでも同じであるとしている。また、 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。このシミュレーションの結果が Fig. 8 である。これを見ると、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変換を用いても不安定になることがわかる。

6. 通信遅れの補償

6.1 変化する通信遅れの補償

通信遅れが一定でなくてもシステムを安定にするために、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、マスター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、Fig. 9 に示すよう

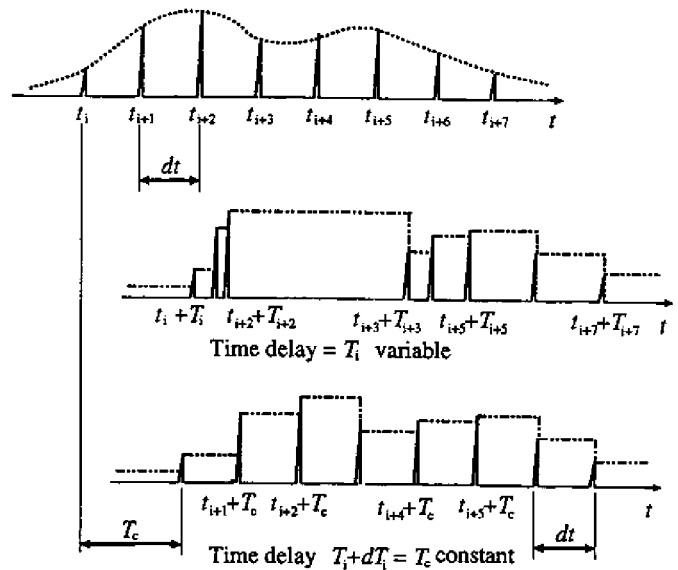


Fig. 9 Compensation to keep time delay constant

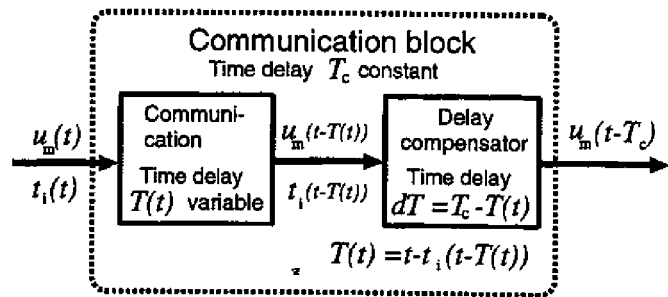


Fig. 10 Structure of compensation system

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_i 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_i で受信されたデータは、受信側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_i 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。

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。このみかけの通信遅れ時間を一定にする補償システムは Fig. 10 のようになる。通信部全体は、最大遅れ時間以上の範囲で自由に設定できる一定の遅れ時間 T_c をもつ通信部を、マスター側、スレーブ側両方に独立にもつような Fig. 11 に示すシステム構成となる。

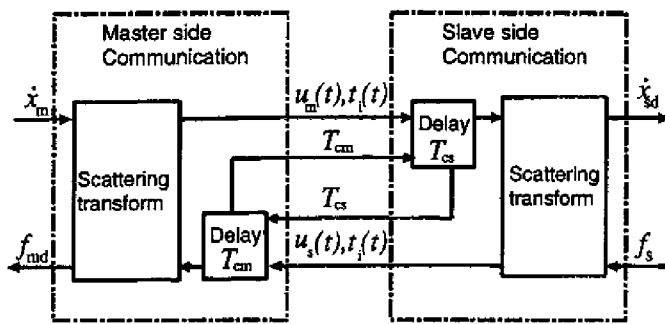


Fig. 11 Communication block with compensation system

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Fig.3, Fig.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。

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。送信側でのデータの送信周期を T とすると、 $e\%$ の欠落が起こった場合には平均的な受信周期は $\frac{T}{(100-e)/100}$ になると考えられる。 $T = 2[\text{ms}]$, $e = 5\%$ の場合には、平均的な受信周期は2.105[ms]となりわずかしこ変化しないため、実用上は問題ないものと考えられ

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、ネットワークのトラフィック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、Fig.11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とする。

7. テレオペレーションシステムの制御系構成

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テレオペレーションシステムを構成する。

実際のマニピュレータは、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、次のようなみかけのインピーダンス特性を持つように、マニピュレータを制御することを考える。

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

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

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 : スレーブ側からマスタ側へ送られる力情報

f_e : スレーブアームが環境に与える力

ここで、 f_s はマスタ側へ伝達される力情報で、先の式(7)のように与え、Scattering変換(式(8),式(9))を

用いて補償する。

この制御の方法としては、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る。

まず、各マニピュレータの手先に取り付けられた力覚センサから、オペレータの操作力 f_h と環境に与える力 f_e を得る。ここで先のインピーダンスモデルを仮想内部モデルとして、これらの外力がこの仮想内部モデルに加えられた時の、このインピーダンスモデルの運動を制御コンピュータ上で計算する。このモデルの運動に実際のマニピュレータが追従するように運動を制御することより、実際のマニピュレータが先のみかけのインピーダンス特性を持つように制御される。

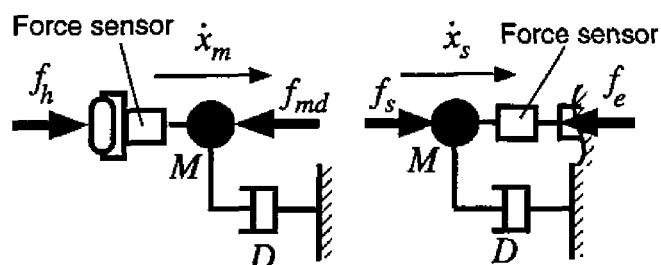


Fig. 12 Impedance model

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自由度のバイラテラル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。各マニピュレータのサーボ周期は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。

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Fig.13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せず実用上は問題ない。

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Fig.14である。通信の遅れ時間を見ると、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

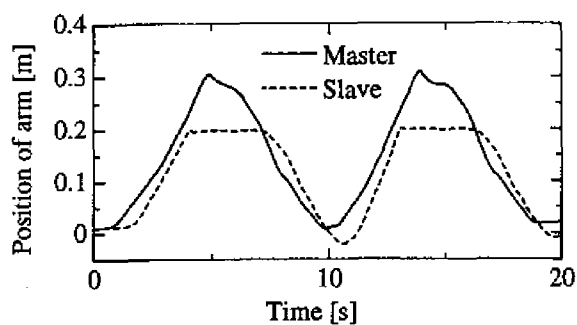
ネットワークを介したテレオペレーションシステムにおいて、新たに生じる問題点として、通信の遅れ時間が不規則に変化する点を指摘した。遅れ時間の変化速度が大きい場合には、Scattering変換を用いてもシステムが不安定になることを示した。

この問題の解決策の第一歩として、みかけの遅れ時間が一定になるように、遅れ時間を補償することによって、Scattering変換により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。

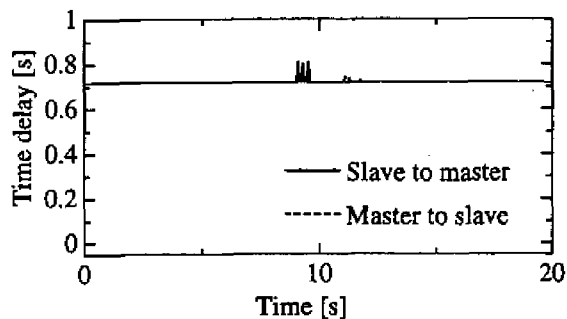
なお本研究は、平成7年度文部省科学研究費補助金一般研究(C)(07650304)の援助を受けて行なわれている研究の一部である。

参考文献

- 1) Robert J. Anderson, Mark W. Spong: Bilateral Control of Telemanipulators with Time Delay, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.34, No.5, pp.494-501 (1989).
- 2) 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・スレーブマニピュレータのバイラテ

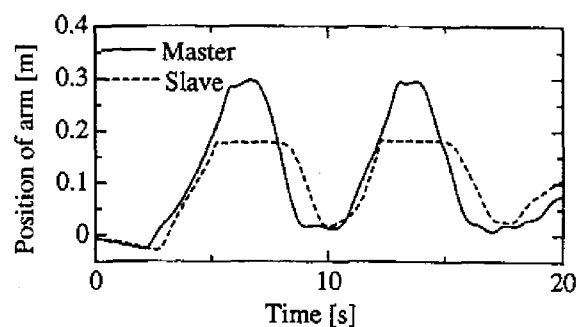


(a) Position of arm

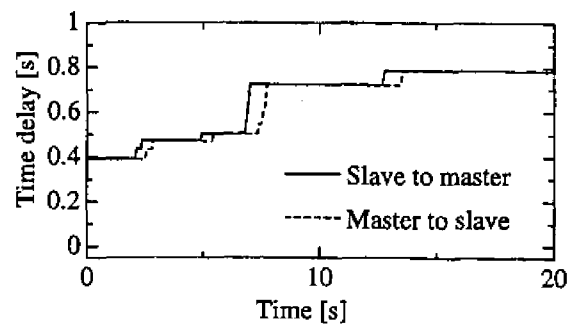


(b) Time delay

Fig. 13 with time delay compensation (time delay 0.718[s])



(a) Position of arm



(b) Time delay

Fig. 14 Adapt to an increase in traffic

ラル制御, 計測自動制御学会論文集, 第27巻, 第1号, pp.56-63 (1991).

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, pp.55-62 (1988).

4) 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, pp.759-760 (1995).

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, pp.761-762 (1995).

6) J.Dudragne, C.Andriot, R.Fournier, J.Vuilleme: A GENERALIZED BILATERAL

CONTROL APPLIED TO MASTER-SLAVE MANIPULATORS, In Proceedings, 20 ISIR, pp.435-442 (1988).

7) Gunter Niemeyer, J.E.Slotine: ADAPTIVE CONTROL AND STABLE TELEOPERATION, 1990 Japan-USA symposium on flexible automation - a opacific rim conference- ISCIE, pp.1391-1398 (1990).