研究論文

インターネットを用いた空気圧マスタ・スレーブシステムの
バイラテラル遠隔制御に関する研究*修 震**, 北川 能**, 留 滄海**,
呉 平東***, 塚越 秀行**A Study on an Internet-based Pneumatic Master-slave
Bilateral Tele-operation System

Zhen XIU, Ato KITAGAWA, Canghai LIU, Pingdong WU, Hideyuki TSUKAGOSHI

For an Internet-based pneumatic master-slave system, this paper presents an effective experimental method to realize the bilateral tele-operation with varying time-delay. Firstly, based on the measured time-delay between Beijing and Tokyo, the variable difference of time-delay between TCP and UDP protocols and their features on data transmission are described. Secondly, after the discussion on the unstable problem of the pneumatic master-slave system caused by the time-delay, a compensator to ensure the stability of system with varying time-delay was proposed. Thirdly, the corresponding data processors for TCP and UDP were proposed to solve the sampling disorder problem caused by varying time-delay. Finally, the validity of the proposed compensator and processors were proven by experiments using the measured time-delay between Beijing and Tokyo.

Key words : Master-slave system, Bilateral control, Tele-operation, Pneumatic system, Time-delay

1. 緒 言

インターネットは技術者や専門家だけでなく一般人でも使える国際的なネットワークである。総務省のU-Japan政策¹⁾では、2010年までに「いつでも、どこでも、何でも」インターネットを利用できる「ユビキタスネット社会」を実現することが目標に据えられている。このようなインターネットを遠隔制御に用いると、人々の日常生活の質が改善できる。例えば、インターネットを利用したバイラテラル制御による遠隔リハビリシステムが実現できれば、理学療法士が患者の症状を感じとることができ、患者の家を直接訪問する必要がなくなるので、在宅リハビリが可能となる。高齢化社会では、多くの過疎地の患者への対応が求められており、通院が不要となる本システムには大きな意義がある。

一方、インターネットでは通信の際に変動する時間遅れが発生する。バイラテラル制御システムの前向きおよび後ろ向き経路における時間遅れはシステムに不安定をもたら

すため、インターネットを用いたシステムでは、制御手法と情報伝達に対し工夫が必要となる。時間遅れを持つシステムの安定性の向上について、制御手法^{2)~5)}が提案されている。しかし、従来の制御手法では変動する時間遅れをモデルの不確かさとして扱っており、インターネットのプロトコルおよびそれに基づいたデータ伝送の問題についてはあまり言及されていない。また、時間遅れをモデルの不確かさとして扱う場合、時間遅れの変動範囲を事前に把握する必要があるが、実際の時間遅れを補償器に利用すればその必要はない。

そこで本論文では、まずインターネットで発生する時間遅れについて、プロトコル（TCPおよびUDP）による変動の違いならびに伝送されたデータの特徴を調べる。次に、その結果に基づいて変動する時間遅れに対応可能な補償器を考案する。さらに、変動する時間遅れによって起こる受信データの乱れを補修するデータ処理器を提案する。最後に、空気圧駆動マスタ・スレーブシステムを用いて実験を行い、提案した補償器およびデータ処理器の有効性を明らかにする。

2. インターネットによる時間遅れ

本研究では図1のようにバイラテラル制御によるマスタ・スレーブシステムのデータ伝送にインターネットを使っているため、まずインターネットにより発生する時間遅れの大きさおよび伝送されたデータの特徴を調べる。

*平成20年7月14日 原稿受付

**東京工業大学大学院理工学研究科

(所在地 〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

(E-mail : kitagawa@cm.ctl.titech.ac.jp)

***北京理工大学機電一体化センター

(所在地 〒100081 中国北京市海淀区中关村南大街5号)

Fig. 1 Internet-based bilateral tele-operation system

そこで、TCPプロトコルとUDPプロトコルによる時間遅れを次の方法を用いて測ることにした。すなわち10ms毎の時刻情報が書き込まれたデータグラム一個をローカルコンピュータから発信し、リモートコンピュータがそれを受信すると同時にローカルコンピュータに再発信することにより、ループ時間遅れを得る方法である。後に行う遠隔制御の実験ではここで測定された時間遅れを10ms毎のサンプリングデータに加え、インターネットによる時間遅れを仮想的に発生させるために用いる。

(a) TCP Protocol

(b) UDP Protocol

Fig. 2 Time-delay under TCP and UDP protocol and its influence to signal transmission

図2はこの方法で測定した北京理工大学（中国北京）と東京工業大学間のインターネットによる時間遅れである。実験では“Sent signal”で示す正弦波信号を送信し、“Received signal”で示す信号を受信した。その送信時刻と受信時刻の差から計算されたループ時間遅れを図2(a)(b)の下段に示した。図2からわかるように、TCPとUDPプロトコルの両方とも時間遅れが発生し、その大きさは変動している。したがって、一定のサンプリング時間間隔内にデータが届かなかったり、複数届いたりする受信乱れが発生することになる。

さらに、UDPプロトコルを用いた場合、TCPプロトコルに比べて時間遅れがかなり異なっており、時間遅れの大きさや変動幅は小さいが、TCPプロトコルのようなデータの到着確認機能がないので、データの受信漏れや順序の乱れ（これも結果として受信漏れにつながる）のような受信乱れも起こることになる。図2(b)の○印は、受信できなかったデータグラムを表しており、UDPプロトコルではデータの受信漏れがしばしば発生することが分かる。

TCPあるいはUDPプロトコルを遠隔制御に使うには、これらの問題を考慮する必要がある。そこで、次章ではここで測定された時間遅れを用いて空気圧駆動マスタ・スレーブシステムの安定性に及ぼす影響を調べる。

3. 時間遅れによる不安定化の実験

3.1 空気圧駆動マスタ・スレーブシステム

本研究はバイラテラル制御によるマスタ・スレーブシステムを用いた遠隔リハビリシステムの構築を最終目標としているので安全性や柔軟性の面でこれに最も適していると考えられる空気圧駆動を用いる。図3、図4は空気圧駆動マスタ・スレーブシステムの実験装置とブロック線図である。マスタとスレーブは空気圧ロータリーアクチュエータ（黒田精工(株)製）を用いる。アクチュエータの出力軸に回転型ポテンシオメータと自作のトルクセンサを取り付け、回転角度とトルクを測定する。図4の $G_M(s)$ はマスタ、 $G_S(s)$ は対象物を含むスレーブを表している。また、 T_M はオペレータの操作トルク、 T_S は対象物の反力トルクである。

Fig. 3 Master-slave experimental device

Fig. 4 Block diagram of master-slave system

本研究では力帰還型バイラテラル制御⁶⁾を用いる。すなわち位置情報をマスタからスレーブに送り、位置決め制御を行うと同時に、力情報をスレーブからマスタへフィードバックし、マスタの空気圧ロータリーアクチュエータの両部屋の圧力を制御して反力を再現する。

この実験装置の基礎特性を調べるため、スレーブの操作対象物として図3のようにばね2個を取り付け、前節で測定した時間遅れを加えずに実験を行った。マスタとスレーブの回転角度とトルクの変化を図5に示す。スレーブの回転角度とトルクはマスタによく追従することがわかった。すなわち、時間遅れを加えない場合はこのマスタ・スレーブシステムは安定に制御できると言える。

Fig. 5 Tracing experimental results

3.2 時間遅れを加えた実験

マスタとスレーブ間の情報伝達にインターネットを用いた場合、マスタ・スレーブシステムのブロック線図は図6のようになる。 $F_1(s)$ および $F_2(s)$ はそれぞれ前向きおよび後ろ向き経路の時間遅れである。

Fig. 6 Tele-operation system with time-delay

このような前向きと後ろ向き経路の時間遅れの影響を調べるため、まず基準となる時間遅れを20秒間にわたって測定し、以後は常にそれを仮想的な時間遅れとして用いることにした。測定に使用したプロトコルは、TCPプロトコルより時間遅れが小さく、影響がより小さいと思われるUDPプロトコルである。図2(b)と同じ条件下で時間遅れの測定を2回行った結果を図7に示す。図5の実験に用いた実験装置において図5と同様、スレーブの操作対象物としてばねを用い、前向き経路の時間遅れ $F_1(s)$ として図7(a)、後ろ向き経路の時間遅れ $F_2(s)$ として図7(b)に示す時間遅れを仮想的に加えた場合の追従実験の結果を図8に示す。スレーブのトルクはマスタのトルクに追従できず、またマスタは点線で示した予定した軌道に沿うような操作ができなかった。これは時間遅れが原因と考えられ、安定性が失われたものと考えられる。TCPプロトコルの場合は、遅れ時間の大きさや変動幅が大きいので、このことはさらに顕著に現れると推察される。したがって、インターネットを用いる場合、安定性確保のための補償器を導入する必要がある。

(a) Time-delay (1)

(b) Time-delay (2)

Fig. 7 Time delay under UDP protocol

Fig. 8 Tracing experimental results with time-delay

4. 安定化のための補償器の提案

4.1 補償器の基本的な考え方

補償器の設計は図9に示すように、前向き経路の時間遅れ $F_1(s)$ の影響を補償する補償器 $G_1(s)$ と、後ろ向き経路の時間遅れ $F_2(s)$ の影響を補償する補償器 $G_2(s)$ を設計することにより行う。

Fig. 9 Principle of compensator

時間遅れがない場合、すなわち図4のシステムの伝達関数と特性方程式は式(1)と式(2)で表わされる。

$$G_{\text{original}}(s) = \frac{G_M(s) \cdot G_S(s)}{1 + G_M(s) \cdot G_S(s)} \quad (1)$$

$$1 + G_M(s) \cdot G_S(s) = 0 \quad (2)$$

図6において後ろ向き経路の時間遅れ $F_2(s)$ だけが存在する場合のフィードバックシステムを考えると、その伝達関数 $G_f(s)$ は式(3)、特性方程式は式(4)で表わされる。

$$G_f(s) = \frac{G_M(s) \cdot G_S(s)}{1 + G_M(s) \cdot G_S(s) \cdot F_2(s)} \quad (3)$$

$$1 + G_M(s) \cdot G_S(s) \cdot F_2(s) = 0 \quad (4)$$

式(4)に時間遅れ $F_2(s)$ が入っているため、式(1)のシステムが安定であっても、式(3)のシステムは不安定になる可能性がある。そこでこのシステムの前向き経路に補償器 $G_2(s)$ を入れた場合、システムの伝達関数 $G_{\text{com2}}(s)$ は式(5)で表わされるが、これがもとの伝達関数 $G_{\text{original}}(s)$ と等しくなるように $G_2(s)$ を式(6)のように決めれば、時間遅れの影響を取り除くことができる。

$$G_{\text{com2}}(s) = \frac{G_M(s) \cdot G_2(s) \cdot G_S(s)}{1 + G_M(s) \cdot G_2(s) \cdot G_S(s) \cdot F_2(s)} \quad (5)$$

$$G_2(s) = \frac{1}{1 + G_M(s) \cdot G_S(s) \cdot (1 - F_2(s))} \quad (6)$$

次に、ここで求めた補償器 $G_2(s)$ を入れたシステムの前向き経路に、さらに時間遅れ $F_1(s)$ を加えてみる。この場合、前向き経路の時間遅れ $F_1(s)$ に対しては、スミス補償器の考

え方⁷⁾に基づいて補償器 $G_1(s)$ を式(7)のように決めることができる。

$$G_1(s) = F_2(s) \cdot (1 - F_1(s)) \cdot G_S(s) \quad (7)$$

以上のようにして時間遅れ $F_1(s)$ と $F_2(s)$ を持つシステムの補償器 $G_1(s)$ と $G_2(s)$ を決めればブロック線図は図9の上段の図になる。図9の上段の図を等価変換すれば、下段の図になり、もとのシステム(図4)と時間遅れ $F_1(s)$ の直列結合になり、伝達関数は式(8)になる。したがって、もとのシステムが安定であれば図9の上段に示すシステムも安定になると言える。

$$G(s) = \frac{G_M(s) \cdot G_S(s)}{1 + G_M(s) \cdot G_S(s)} \cdot F_1(s) \quad (8)$$

4.2 変動する時間遅れに対する補償器の提案

式(6)と式(7)を図9の上段の図に代入すれば、図10に示すブロック線図になり補償器は1つにまとまる。図10の網掛け部分がその補償器である。なお、本論文では補償器内にある $G_S(s)$ 、 $F_1(s)$ 、 $F_2(s)$ はノミナルモデルを使うこととし、 $\hat{G}_S(s)$ 、 $\hat{F}_1(s)$ 、 $\hat{F}_2(s)$ で示した。図からわかるように、点Aから加え合せ点Bまでの伝達ルートにはRoute1とRoute2がある。Route1にある $F_1(s)G_S(s)F_2(s)$ とRoute2にある $\hat{F}_1(s)\hat{G}_S(s)\hat{F}_2(s)$ が等しければフィードバック信号 U_1 と U_2 は等しくなり、さらに $G_S(s)$ と $\hat{G}_S(s)$ が等しければ、補償器の出力 T'_s はもとのシステム(図4)のフィードバック信号 T_s と等しくなる。したがってもとのシステムが安定であれば図10に示すシステムも安定になる。一方、図2のように、インターネットの時間遅れは一定ではないので、時間遅れのノミナルモデル $\hat{F}_1(s)$ 、 $\hat{F}_2(s)$ を決めるには予測が必要になる。しかし、その予測が困難であるため $\hat{F}_1(s)\hat{G}_S(s)\hat{F}_2(s)$ を正確に求めることが難しく、図10に示す補償器を実現することは難しい。そこで、図11のようにRoute2はマスタ側の点Aからインターネットを経由して点Bに至るようにし、ノミナルモデル $\hat{F}_1(s)$ 、 $\hat{F}_2(s)$ ではなく、実際の $F_1(s)$ 、 $F_2(s)$ をRoute2に入れることによって時間遅れを予測することを不要とした。このときの補償器を図11に網掛けで示す。なお、図中のFWP、FBPは受信乱れを補正するデータ処理器であり、次節で説明する。

Fig. 10 Tele-operation system with predictor-based compensator

Fig. 11 Tele-operation system with no-predictor compensator

4.3 受信乱れを補正するデータ処理

インターネットによる時間遅れは変動するため、送信側から一定時間間隔毎に送ったデータグラムが受信側では必ずしも一定時間間隔毎に受信されないという問題がある。すなわち受信側の次のサンプリング時までにはデータグラムが全く受信されない場合や逆に2個以上のデータグラムが受信されてしまう場合がある。したがって、マスタとスレーブ間に受信乱れを補正するデータ処理器を導入する必要がある。図11に示すように、データ処理器FWPは前向き経路における受信乱れを補正し、データ処理器FBPはRoute1およびRoute2の後ろ向き経路における受信乱れを補正する。

Fig. 12 Sampling disorder problem

次に、これらのデータ処理器が行う補正処理を説明する。本論文では、図12に示すように、次のサンプリング時までには正しく1個のデータグラムが受信される場合を単サンプリングと呼び、次のサンプリング時までにはデータグラムを受信しない場合を空サンプリング、複数のデータグラムを受信する場合を多数サンプリングと呼ぶことにする。データ処理器は、単サンプリングの場合は受信データグラムをそのまま出力し、空サンプリングの場合は受信データグラムが無いので、直前のサンプリング時の出力データグラムを再度出力する。多数サンプリングの場合は最新の受信データグラムを出力する。TCPプロトコルおよびUDPプロトコルの両者とも受信乱れの問題があるため、どちらもこのようなデータ処理が必要である。

さらにUDPプロトコルで通信する場合には、2章で説明したように、TCPプロトコルの場合と異なり、データグラムがなくなるあるいは順番が乱れることがある。本論文で

はこれに対処するため、UDPプロトコルを使う場合、送信のサンプリング時間は受信のサンプリング時間の半分とすることにした。図13はその一例である。送信頻度が受信頻度の2倍になっている。UDPプロトコルでは連続してデータグラムを失うことは少ないので、一方のデータグラムがなくなっても他方のデータグラムが受信できる。データ処理器はこのデータグラムをもとに前述の処理を行って出力する。

Fig. 13 Sending and receiving sequence for UDP

4.4 検証実験

図11に示す補償器およびデータ処理器の効果を検証するため、図5と同様、スレーブの操作対象としてばねを用いて実験を行った。追従実験の結果を図14に示す。UDPプロトコルによる時間遅れがあっても、スレーブの角度とトルクはマスタに追従しており、システムは安定であることが示されている。

Fig. 14 Tracing experimental results with UDP time delay

次に、TCPプロトコルを用いた場合の補償器およびデータ処理器の効果を調べた。図2(a)と同じ条件下で時間遅れの測定を20秒間にわたって2回行った結果を図15に示す。図5と同様、スレーブの操作対象としてばねを用い、前向き経路の時間遅れ $F_1(s)$ として図15(a)、後ろ向き経路の時間遅れ $F_2(s)$ として図15(b)に示す時間遅れを仮想的に加えた場合の追従実験の結果を図16に示す。TCPプロトコルによる時間遅れがあっても、スレーブの角度とトルクはマスタに

追従しており、システムは安定であることが示されている。

に改善していく必要があると考えられる。

(a) Time-delay (1)

以上のように、補償器およびデータ処理器を用いること

(b) Time-delay (2)

Fig. 15 Time-delay under TCP protocol

Fig. 16 Tracing experiment results with TCP time-delay

により、UDPプロトコルあるいはTCPプロトコルのどちらを用いても空気圧駆動マスタ・スレーブシステムのバイラテラル遠隔制御を安定に行うことができることが分かった。

本論文では国際間のインターネットで発生する比較的大きな時間遅れを仮想的に使ったが、国内の場合はそれより時間遅れが小さいと考えられるので、本論文で提案した補償器およびデータ処理器を用いることにより、国内でのインターネットによる遠隔制御は安定に行うことが可能と考えられる。なお、本論文で提案したデータ処理機は北京東京間で計測した時間遅れの例に対応したものであり、今後様々なネット環境に対応するためにはデータ処理器をさら

Fig. 17 Pseudo bilateral master-slave tele-operation system

本研究で提案した図11に示す補償法は基本的にはスミス補償法をベースにしたもので、 $G_s(s)$ のモデル誤差が小さいほど安定性が確保しやすいものと言える。一方、本研究はマスタ・スレーブシステムを対象としており、安定性確保のほかに力覚の再現が重要である。図17に示す従来の擬似的なバイラテラル制御法では $\hat{G}_s(s)$ を用いて擬似的な反力を再現しているため、モデル誤差はそのまま擬似的な反力に反映されるが、図11では従来の制御法に加えてモデル $G_s(s)$ の時間遅れを含めた出力誤差 U_3 をフィードバックしており、モデル誤差の反力への反映を少なくすることができるので、力覚の向上につながる利点がある。

5. 結 言

本研究はインターネットを用いた空気圧駆動マスタ・スレーブシステムを対象とし、変動する時間遅れに対して安定にバイラテラル遠隔制御が可能となる補償器ならびにデータ処理器を提案した。実測した北京東京間のインターネット時間遅れを仮想的に加えた追従実験により、提案した補償器及びデータ処理器が有効であることを明らかにした。今後、この成果をもとに遠隔リハビリシステムを構築する予定である。

参 考 文 献

- 1) 総務省：U-Japan推進計画2006 (2006)
- 2) Anderson, M.W. Spong : Bilateral control of tele-operators with time delay, Proceedings of the 27th Conference on decision and Control, 131/138 (1988)
- 3) Munir, S. Wayne J. Book : Wave-based tele-operation with prediction, Proceedings of the American Control Conference, 4605/4611 (2001)
- 4) P. F. Hokayem, M.W. Spong : Bilateral teleoperation : An Historical Survey, Automatica, **42**-12, 2035/2057 (2006)
- 5) Dongjun Lee, M.W. Spong : Passive bilateral teleoperation with constant time delay, IEEE transactions on robotics, **22**-2, 269/281 (2006)
- 6) 小林尚登他：ロボット制御の実例，計測自動制御学会，228/241 (1997)
- 7) O. J. M. Smith : A Controller to Overcome Dead Time, ISA J., **6**, 28/33 (1959)