ジッタバッファを用いたネットワークバイラテラル制御システム

学生員 加藤 敦* 正員 西 宏章*
上級会員 大西 公平*

Network Bilateral Control System with Jitter Buffer

Atsushi Kato*, Student Member, Hiroaki Nishi*, Member, Kouhei Ohnishi*, Senior Member

Jitter is a technical issues of network bilateral control system. Hence, this paper proposed the jitter buffer method, which makes transmission delay constant. The validity of proposed system is confirmed by the experiments.

キーワード：遠隔操作システム，バイラテラル制御，通信遅延，ジッタ，リアルタイムシステム

Keywords: remote control system, bilateral control, transmission delay, jitter, real time system

1. はじめに

現在，ネットワークを用いた遠隔操作システムは様々な分野で注目されている技術である。例えば，医療分野では2001年9月太西洋越しにロボットを遠隔操作して外科手術をすることに成功しており⁽¹⁾，今後実用化することが希求されている技術である。遠隔操作システムにおいて，遠隔地にある環境を再現することが重要な目標指標となるが，通信遅延やその変動（ジッタ）によってその再現性が劣化する。さらに，ジッタはシステムそのものを不安定にする。そこで，本論文では良好な再現性を実現し，システムの安定性を図るため，通信遅延が変動しないネットワークシステムを提案し，その有効性を実験によって確認する。

2. バイラテラル制御システム

本論文では，図1で示される実験システムを用いる。実験システムはリニアモータによって構成され，その動力学方程式は(1)式のように表すことができる。

$$M_n \ddot{x} = K_m i_a^{ref} - f^{dis} \dots \dots \dots (1)$$

$$f^{dis} \equiv f^{fric} + f^{ext} \dots \dots \dots (2)$$

図1 実験システム
Fig. 1. Experimental system.

ここで， M は質量， K_t は推力定数， I_a^{ref} は電流参照値， n はノミナル値， f^{dis} は外乱力， f^{fric} は摩擦力， f^{ext} は反作用力を表わす。そして，外乱力を(2)式のように定義する。本論文ではIidaらが提案した4chバイラテラル制御系⁽²⁾（図2）を適用する。この制御系はバイラテラル制御の目的である $x_m = x_s$ ， $f_m = -f_s$ を実現し，遠隔地の環境を再現することができる。そして，本論文では通信遅延があるため，この制御系は次式のように表される。

$$\begin{aligned} \dot{x}_m^{ref} = & C_p (e^{-sT_1} x_s^{res} - x_m^{res}) \\ & + C_f (e^{-sT_1} \hat{f}_s^{ext} + \hat{f}_m^{ext}) \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_m^{ref} = & C_p (e^{-sT_1} x_s^{res} - x_m^{res}) \\ & + C_f (e^{-sT_1} \hat{f}_s^{ext} + \hat{f}_m^{ext}) \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

このとき， $C_p (= K_p + K_v s)$ は位置制御システム， $C_f (= \frac{K_f}{M_n})$ は力制御システムを表し， T_0 ， T_1 はそれぞれ通信遅延を表わす。また， $\hat{f}^{ext}$ は反力推定オブザーバ⁽³⁾によって，推定された反作用力である。

図2 ネットワークバイラテラル制御システム
Fig. 2. Network bilateral control system.

* 慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科
〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1
Department of System Design Engineering, Faculty of Science and Technology, Keio University
3-14-1, Hiyoshi, Kouhoku-ku, Yokohama 223-8522

図 3 実験システム

Fig. 3. Experimental system.

図 4 実験結果 (通信)

Fig. 4. Experimental results (communication).

3. ネットワークシステム

システム全体を図 3(a) に示す。ジッタが存在すると、情報に揺らぎが生じ、通信する情報の品質が保てず、環境の再現性や安定性を図ることができない。従来、リアルタイム OS である RTLinux を用いることで、よりジッタが少ないバイラテラル遠隔操作システムを構築することができた⁽⁴⁾。しかし、通信経路においてリアルタイム性が確保できないため、ジッタが発生し、通信情報の品質を図ることができなかった。そこで、本論文では図 3(b) に示すように受信したパケットをバッファリングすることによって、ジッタが存在しないようにする手法 (ジッタバッファ) を提案する。この手法では送信するパケットにタイムスタンプを付け、受信側ではそのタイムスタンプに基づいてバッファリングし、情報を取り出すことによって、通信遅延を一定にする。この手法の有効性を確認するために、正弦波信号 (10 Hz) を送受信する実験を行った。図 4(a) に従来法と提案法を比較した実験結果を示す。従来法 (con) ではジッタが存在するため受信した波形に揺らぎが存在する。一方、提案法 (pro) は遅延が従来法より大きい、揺らぎが存在せず、送信した波形をそのまま保つことができる。また、従来法、提案法に対して、FFT を行った結果を図 4(b) に示す。図 4(b) より、従来法では揺らぎにより信号に雑音が混入するが、提案法ではそのような影響を抑えることができた。

4. 実験

提案するジッタバッファを用いて遠隔操作システムの実験を行った。表 1 に実験で用いたパラメータを示す。 τ は制御周期を表わし、送信周期、受信周期も同じ 1 ms である。図 5(a) に位置応答、図 5(b) に力応答、図 5(c) に通信遅延の

表 1 実験システムのパラメータ

Table 1. The parameters of experimental system.

K_f [N/A]	22.0	M [kg]	0.4	τ [ms]	1.0
K_p	2500	K_v	100	K_f	1

(a) Position results

(b) Force results

(c) Round trip time

(d) Network system

図 5 実験結果 (バイラテラル制御)

Fig. 5. Experimental results (bilateral control).

結果を示す。また、図 5(d) に実験で用いたネットワークの構成を示す。実験では、環境に接触しない場合、柔らかい環境に接触した場合、硬い環境に接触した場合の 3 種類の実験を行った。実験結果より、位置応答、力応答が一致し、それぞれの環境を区別することができた。また、情報が届かない場合を除いて、時間の揺らぎをジッタバッファが吸収し、通信遅延を一定 (10 ms) に保つことができた。

5. おわりに

本論文ではバイラテラル遠隔制御システムにおいて、通信遅延の変動を一定にするジッタバッファを用いる手法を提案した。提案した手法は通信遅延を一定にし、ジッタが存在しないようにすることができる。そして、通信遅延が一定のため、安定性を図ることができ、良好な再現性を実現することができる。また、提案する手法に基づき実験を行い、その有効性を確認した。

(平成 18 年 3 月 23 日受付)

文 献

- (1) Marescaux J, et al.: "Transatlantic robot-assisted telesurgery", *Nature*, Vol.413, 27th, pp.379-380 (2001-9)
- (2) W. Iida and K. Ohnishi: "Reproducibility and operability in bilateral teleoperation", *Proc. of IEEE Int. Workshop on Advanced Motion Control*, pp.217-222 (2004)
- (3) T. Murakami, F. Yu, and K. Ohnishi: "Torque Sensorless Control in Multidegree-of-Freedom Manipulator", *IEEE Trans. IE*, Vol.40, No.2, pp.259-265 (1993-2)
- (4) A. Kato, E. Ishii, and K. Ohnishi: "Bilateral Control System with Wireless LAN", *Proc. of the 2005 Japan Industry Appl. Soc. Conf.*, Vol.2, pp.169-172 (2005) (in Japanese)
加藤 敦・石井恵奈・大西公平:「無線 LAN を用いたバイラテラル制御システム」, 電学産業応用部門大講演論, Vol.2, pp.169-172 (2005)