

IP ネットワークを介した小形 DC モータのジッタバッファを用いた 遠隔制御に関する検討

Consideration for Remote Control Using Jitter Buffer of a Small DC Motor through IP Network

○三宅一弘*, 松尾健史*, 三浦 武*, 田島克文*

○Kazuhiro Miyake*, Kenshi Matsuo*, Takeshi Miura*, Katsubumi Tajima*

*秋田大学

*Akita University

キーワード：遠隔制御(remote control), DC モータ(DC motor),
IP ネットワーク(IP network), ジッタバッファ(jitter buffer)

連絡先：〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1 秋田大学大学院 工学資源学研究所
松尾健史, Tel. : (018)889-2338, Fax. : (018)837-0406, E-mail : matsuo@ipc.akita-u.ac.jp

1.はじめに

現在, インターネットすなわち IP ネットワークは, 広く普及し, インターネットの技術の発達には目覚ましいものがある.

よって, 我々の生活にも深く浸透し, 電子メールなど様々なアプリケーションに用いられている.

近年において, IP ネットワークを介した技術が様々な分野で注目されている. そこで, モータ制御システムに IP ネットワークを用いた研究を行う. 本研究では, モーションコントロールに用いられる DC モータを制御対象とする. そこで, IP ネットワークを介して DC モータの制御システムを構築し, 実験を行う.

しかし, IP ネットワークは, 遅延時間, 遅延時間の揺らぎ (ジッタ), パケット損失がネットワークの混雑状況, ネットワークの物理的な距離により起こる. そのため, 制御性能を低下させる要因となる.

遅延時間の揺らぎの影響を抑える方法として, 文献 1)にはジッタバッファを用いる手法が提案されている. この手法は, ジッタバッファにデータを格納し, その後, ある程度前の格納されたデータが取り出される. そうすることで, 遅延時間を一定にすることができ, システムのむだ時間を一定にすることができる.

IP ネットワークを介した DC モータの制御を行う場合, むだ時間の増加は, 制御上好ましくない. また, どのくらい前の時間(以下, 補

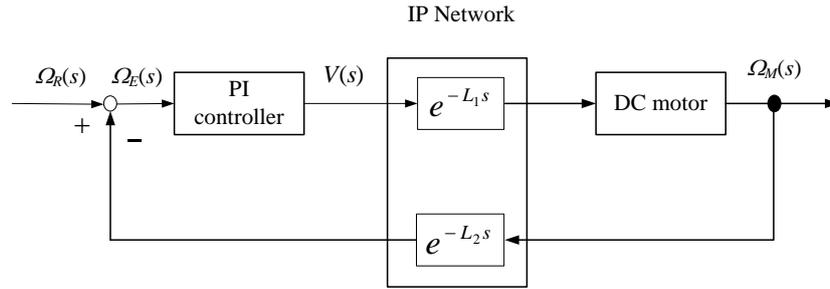


図 1 IP ネットワークを介した DC モータ遠隔制御システムのブロック線図
 Fig.1 Block diagram of remote control system for a DC motor through IP Network

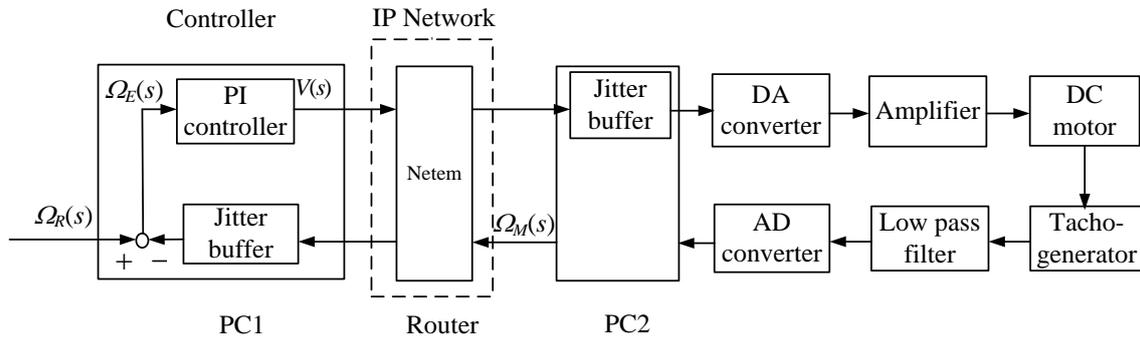


図 2 IP ネットワークを介した DC モータ遠隔制御システムの構成図
 Fig.2 Configuration of remote control system for a DC motor through IP Network

償時間)のデータを読み込めば、一定のむだ時間として扱えるか検討する必要がある。

また、文献 2)では、このシステムを構築し、ネットワークを模擬し、遅延揺らぎに基づいた補償時間を実験的に見つけた。さらに、文献 2)では、ジッターバッファを用いることで、むだ時間を一定にできるため、むだ時間に対応したゲインに自動調整する、ゲインスケジューリングを用いた DC モータの制御法の開発を行った。しかし、ある一つの遅延時間の分布でしか、補償時間の検討は行われていない。

通信遅延時間の分布は、文献 3)において、指数分布に近似できるということが報告されている。また、文献 4)では、遅延時間の分布は、ネットワークの負荷の状況によって正規分布に近似できることが示されている。

そこで、本研究では、正規分布、指数分布を

用いる。また、代表的な分布である一様分布の遅延時間分布を用いて、IP ネットワーク介した DC モータ制御システムを構築し、文献 2)で行った方法で実験を行う。そして、遅延時間の分布に対応した補償時間の検討を行い、ステップ応答波形のばらつきを抑えられるかを検討する。

2. 実験システム

IP ネットワークを介して DC モータの制御を行うシステムを用いる。本研究における実験システムのブロック線図を図 1 に示す。ここで、 $\Omega_R(s)$ は目標回転速度 $[\text{min}^{-1}]$ 、 $\Omega_M(s)$ は DC モータの回転速度 $[\text{min}^{-1}]$ 、 $\Omega_E(s)$ は目標回転速度($\Omega_R(s)$)とモータの回転速度($\Omega_M(s)$)との偏差

[min^{-1}], $V(s)$ はDCモータへの印加電圧値(操作量)[V]となる。また, L_1 及び L_2 は, むだ時間である。

図2は, 本研究で用いる実験システムの構成図である。システムの流れを以下に示す。

Personal Computer 1 (以下PC1) は, 制御を行うコントローラ側である。また, Personal Computer 2 (以下PC2) は, PC1からの印加電圧値をジッタバッファに格納し, 一定時間経過すると, その値をDA変換器に送り, 変換された値は, DCモータへ送られる。さらに, AD変換されたタコジェネレータからの情報を回転速度情報に計算し, PC1へ送信する。PC1においても, ジッタバッファに格納されたデータを一定時間経過すると読み込み, その値をPI制御器に送る。

実際のIPネットワークを介して情報交換を行う場合, 遅延時間, 遅延時間の揺らぎ, パケット損失が発生する。このような問題は, 物理的な距離, ネットワークの混雑度などにより発生する。

本研究では, 実際のネットワーク環境をエミュレートするため, PC1とPC2の間のネットワーク部は, ネットワークエミュレータとしてRouter PCを介している。このRouter PCには, 遅延時間[ms], 遅延時間の揺らぎ[ms], パケット損失[%]が設定可能なソフトウェアとしてNetem⁵⁾がインストールされている。さらに, Netemは分布も設定でき, 通信状況は, 設定した分布の特徴を持つ遅延分布となる。このため, Netemは様々な通信状況を模擬できる。

本研究では, 制御器としてPI制御を用いる。PI制御器の伝達関数は, (1)式となる。

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (1)$$

K_p は比例ゲイン, K_I は積分ゲインを表す。

本研究において制御対象としたDCモータは, 山洋電気社製DCサーボモータR301T-011

である。その仕様を表1に示す。タコジェネレータの発生電圧係数は, $3\text{V}/1000[\text{min}^{-1}]$ のものを使用した。慣性負荷は, $2.5 \times 10^{-5} \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2/\text{rad}$ のものを装着して, 実験を行った。

表1 DCモータの仕様

Table1 Specification of a DC motor	
Rated power	11 W
Rated voltage	24 V
Rated current	1.25 A
Rated speed	3000 min^{-1}

3.ジッタバッファ

3.1 ジッタバッファの受信方式

遅延時間の揺らぎが存在すると, 遅延時間が変動するため, パケットを送信してから, 受信するまでの時間が異なる。文献1)では, ジッタバッファにパケット番号を基にデータを格納することで, 揺らぎの影響を抑える方法が提案されている。

ジッタバッファを用いた通信は, 図3において示される。 T_D は制御システムのむだ時間, T_L は片道遅延時間, T_B は補償時間とする。遅延揺らぎが発生した場合, 例えば, PC1からPC2に送信する場合, パケット情報の入れ替わりが発生する。ジッタバッファを用いる場合, 補償時間 T_B の間データを格納し, むだ時間 T_D 経過すると, ジッタバッファに格納したある程度前のデータを読み込む。ある程度前の時間が, 補償時間 T_B である。図3の場合では, サンプルリング時間 T が1msのため, むだ時間 T_D 経過すると, 3ms前に格納されたデータ1から順番に読み込む。

こうすることで, 遅延時間の揺らぎによるパケットの入れ替わりを防ぐことができる。

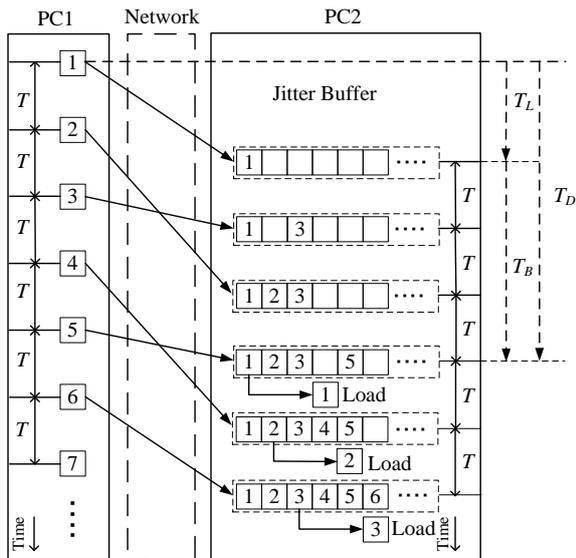


図3 ジッタバッファを用いた通信
Fig.3 Communication with jitter buffer

の RTT(Round Trip Time)情報を基に統計的に表し、システムに設定することで、むだ時間 T_D を一定とした。ここで、RTT は往復遅延時間を表す。RTT は、PC1 から送信された情報が PC2 を経由して PC1 までと届くまでの時間である。

片道遅延時間 T_L は、RTT 情報の中央値 RTT_M を 1/2 倍したものである。補償時間 T_B は、遅延時間の揺らぎの標準偏差 σ と任意の値 X との乗算で求める。片道遅延時間 T_L 、補償時間 T_B は、それぞれ(4)式、(5)式で表す。本研究でも、以上の方法を用いる。

$$T_L = \frac{RTT_M}{2} \quad (3)$$

$$T_B = \sigma X \quad (4)$$

3.2 適切なジッタバッファの求め方

文献 1)で提案されたジッタバッファを用いて、文献 2)で行った遅延時間の変動を補償する方法を分布図で示したものを図 4 に示す。文献 2)の方法は、図 4 で着色された部分の揺らぎの影響による遅延時間の変動に対応できる。 T_D は制御システムのむだ時間、 T_L は片道遅延時間、 T_B は補償時間とする。補償時間 T_B は、むだ時間 T_D から片道遅延時間 T_L の値を減算した値である。よって、制御システムのむだ時間 T_D は、(2)式で表すことができる。

$$T_D = T_L + T_B \quad (2)$$

(2)式によって、図 3 のむだ時間 T_D を一定にすることができる。

しかし、(2)式より、補償時間 T_B の値を大きくすると、むだ時間 T_D の値は、大きくなってしまいうため、制御システム上好ましくない。そのため、文献 2)では、補償時間 T_B の適した値の検討が行われた。

また、文献 2)では、片道遅延時間 T_L 、補償時間 T_B は、制御前の 1000 回分すなわち、1 秒間

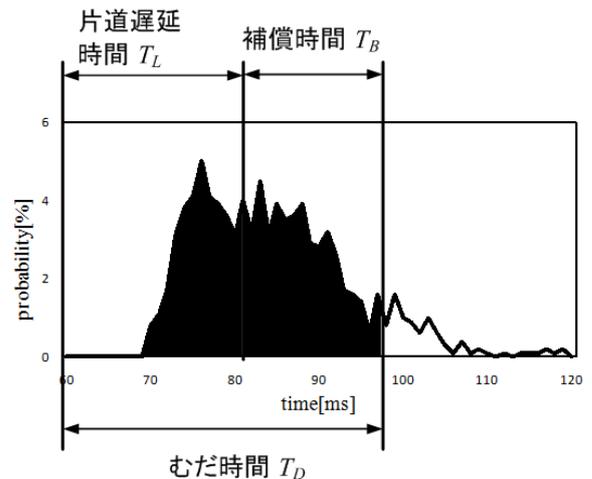


図4 遅延時間の補償
Fig.4 Compensation of Delay time

4.実験

4.1 通信状況の確認

予備実験として、様々な通信状況を再現するために、Netem に分布を設定し、本研究で用いる実験システムで取得できる RTT(Round Trip Time)分布の確認を行う。Netem に設定する分布を以下に示す。

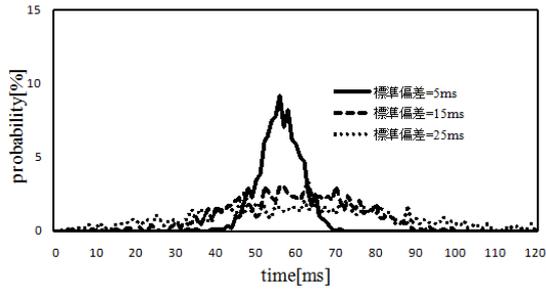


図 5 正規分布に従って変動する通信遅延の分布
Fig.5 Distribution of communication delay that changes according to normal distribution

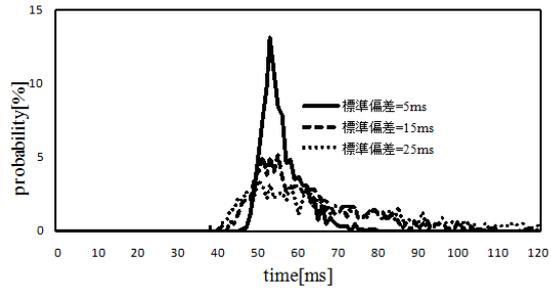


図 6 指数分布に従って変動する通信遅延の分布
Fig.6 Distribution of communication delay that changes according to exponential distribution

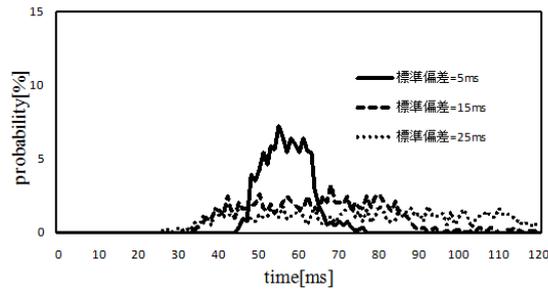


図 7 一様分布に従って変動する通信遅延の分布
Fig.7 Distribution of communication delay that changes according to uniform distribution

- ①正規分布
- ②指数分布
- ③一様分布

文献 4)において、ネットワークの負荷によって、遅延時間の分布は、ネットワークの負荷の状況によって、変化することが示されている。本研究では①、②の分布を用いる。また、代表的な分布である③も用いる。

実験条件として、取得する RTT 分布は、制御前の 1000 回分の RTT 情報を基に作成する。Netem の遅延時間と遅延時間の揺らぎの設定は、片道分のみとした。これは、RTT を基に片道遅延時間を求めることは困難だからである。遅延時間は 50[ms]とし、遅延時間の揺らぎの標準偏差は 5[ms], 15[ms], 25[ms]とした。PC1 で取得された、①から③の分布の場

合の片道分の遅延時間の分布の結果を図 5 から図 7 に示す。図 5 から図 7 より、①から③の分布の特徴を持つ、遅延時間の分布が確認できた。

4.2 通信状況に対応した補償時間の検討

図 5 から図 7 より、本研究で用いる実験システムでもネットワーク通信状況を再現可能なことが確認できた。

実験条件として、DC モータの目標回転速度を 1500[min^{-1}], PI 制御器の K_P を 0.0007, K_I を 0.004 とし、サンプリング時間を 1[ms]とした。ネットワークの設定として、分布は、①から③の分布を用いる。また、それぞれの分布で表 2 に示される条件で 10 回測定を行う。(4)式の X を 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 とした場

合、どの値で最もステップ応答波形のばらつきがなくなるかを検討した。

図 8 は、(a) $X=0.6$ の場合、(b) $X=0.8$ の場合、(c) $X=1.0$ の場合、(d) $X=1.2$ の場合における、遅延時間の揺らぎの標準偏差 $\sigma=25\text{ms}$ 、正規分布を用いた場合のステップ応答波形を示す。

図 8 より、(c) 揺らぎの標準偏差 1.0 倍の場合、ステップ応答波形のばらつきを抑えられていることを確認できた。

以上の方法で、指数分布、一様分布も同様に検討した結果を表 3 に示す。

表 3 の結果を用いて各分布の検討を行った結果は、図 9 から図 11 に示される。このとき、(e)は遅延時間の揺らぎの標準偏差 5ms、(f)は遅延時間の揺らぎの標準偏差 15ms、(g)は遅延時間の揺らぎの標準偏差 25ms である。

通信状況に対応した補償時間 T_B を検討した結果、図 9 から図 11 より、表 3 の X の

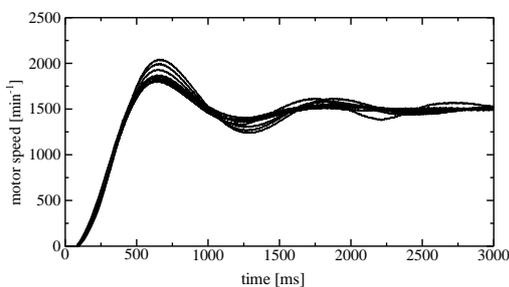
値を用いた場合、各分布におけるステップ応答波形のばらつきを抑えることができた。

表 2 実験条件

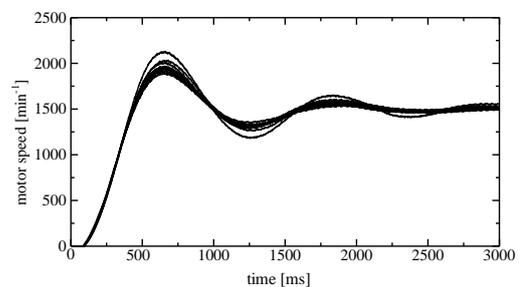
Table2 Condition of the experiment	
遅延時間[ms]	遅延時間の揺らぎの標準偏差 σ [ms]
	5
50	15
	25

表 3 実験結果

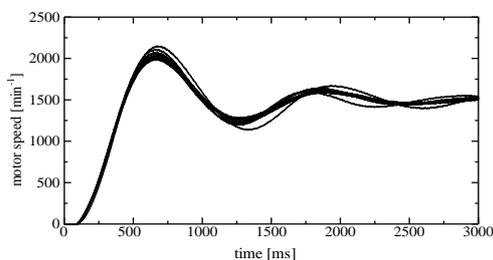
Table3 Result of the experiment	
分布	X
正規分布	1.0
指数分布	0.8
一様分布	1.2



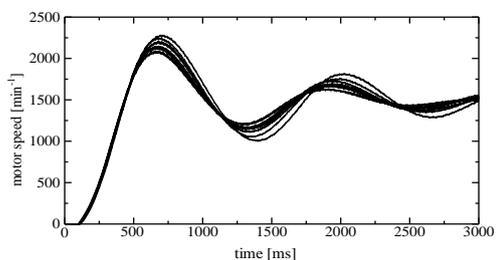
(a) $X=0.6$



(b) $X=0.8$

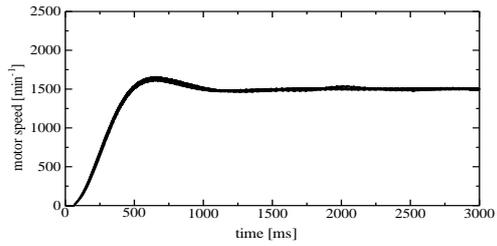


(c) $X=1.0$

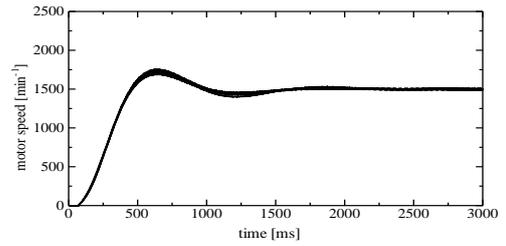


(d) $X=1.2$

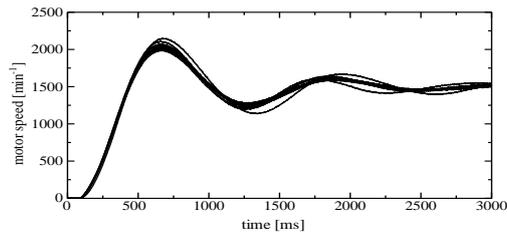
図 8 $\sigma=25\text{ms}$ の場合、正規分布におけるステップ応答波形
Fig.8 Case $\sigma=25\text{ms}$, step response when normal distribution



(e) $\sigma=5\text{ms}$



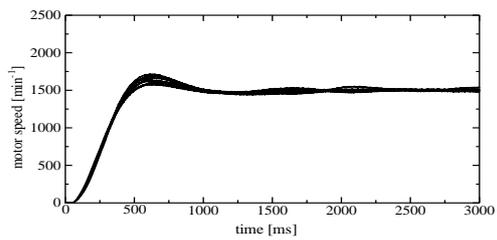
(f) $\sigma=15\text{ms}$



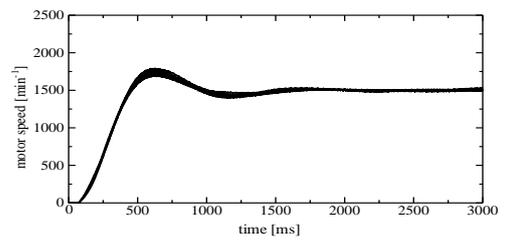
(g) $\sigma=25\text{ms}$

図 9 $X=1.0$ の場合，正規分布におけるステップ応答波形

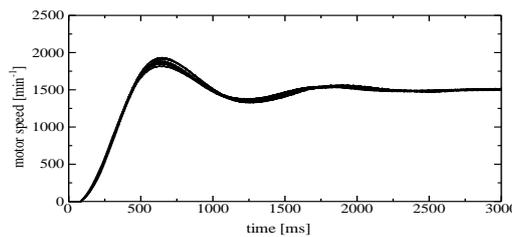
Fig.9 Case $X=1.0$, step response when normal distribution



(e) $\sigma=5\text{ms}$



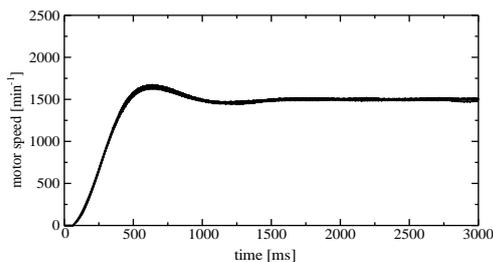
(f) $\sigma=15\text{ms}$



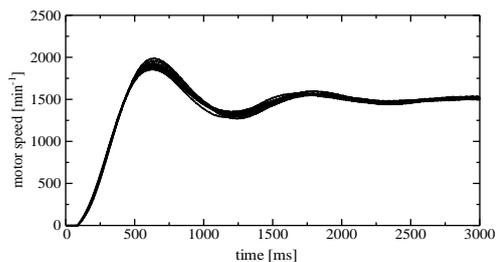
(g) $\sigma=25\text{ms}$

図 10 $X=0.8$ の場合，指数分布におけるステップ応答波形

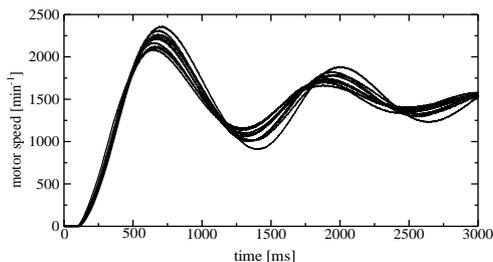
Fig.10 Case $X=0.8$, step response when exponential distribution



(e) $\sigma=5\text{ms}$



(f) $\sigma=5\text{ms}$



(g) $\sigma=5\text{ms}$

図 11 $X=1.2$ の場合，一様分布におけるステップ応答波形

Fig.11 Case $X=1.2$, step response when uniform distribution

5.おわりに

本研究では，通信状況に対応した補償時間 T_B を検討した結果，遅延時間の影響によるステップ応答波形のばらつきを抑えることができた．補償時間 T_B は，遅延時間の揺らぎの標準偏差 σ に X の値を乗算した場合， $X=1.0$ 付近の値で，遅延時間の影響を抑えられた．

しかし，図 8 の(d)より，検討した値よりも大きく設定すると，ステップ応答波形がばらつくことを確認した．

参考文献

- 1) 加藤 敦, 西 宏章, 大西 公平: 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, 電学論 D, **126-12**, 1737/1738 (2006)
- 2) 今野 祐介: IP ネットワークを介した小形

DC モータの遠隔制御法に関する研究, 秋田大学修士論文, 24/78 (2011)

- 3) Y. Tipsuwan, and M.-Y. Chow: Gain Scheduler Middleware: A Methodology to Enable Existing Controllers for Networked Control and Teleoperation-Part I : Networked Control, IEEE Transactions on Industrial Electronics, **51-6**, 1218/1227 (2004)
- 4) 亀井 陽一郎, 平沼 賢次, 田伏 正佳, 高橋 伸弥, 河野 通夫: インターネットを介した遠隔制御のための基礎実験, 情報処理学会論文誌, **45-3**, 838/841 (2004)
- 5) Netem : <http://linuxfoundation.org/pint/5212>