

IP ネットワークを介した DC モータの 通信遅延時間の変動に応じた制御に関する基礎的検討

A Study on Control of a DC Motor System through IP Networks with Changing Network

○高橋勇人*, 松尾健史*, 三浦 武*, 田島克文*

○Yuto Takahashi*, 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),
遅延時間(delay time), 変化点検出(change point detection)

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 工学資源学研究科
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, 情報通信端末が普及しており, これらはインターネット, すなわち IP ネットワークを用いてネットワーク化されている. 近年では, この IP ネットワークの産業的応用¹⁾が考えられている. その応用の一つとして IP ネットワークを介した各種機器の遠隔制御がある.

従来の遠隔制御システムを構築する場合にはその専用回線を準備する必要がある. それと比較して既存の IP ネットワークを用いて制御システムを構築する場合, 新たな専用回線を必要としない. また, 既存の IP ネットワークにコントローラ, アクチュエータ等の機器を取り付けるのみで動作する

ため, 容易かつ安価にシステムの構築が可能である¹⁾. 本研究では, サーボモータの典型例である DC モータを用いて実験を行う.

しかしながら, 既存の IP ネットワークは制御を前提に構築されていない. このため, これを介して制御を行ったとき, 制御性能の劣化が発生する可能性がある. その原因として通信遅延時間やその揺らぎ, およびパケット損失があげられる. この制御性能の劣化に対して, ゲインスケジューリング²⁾あるいは, ジッタバッファや冗長伝送を用いる³⁾などの改善法が提案されている.

しかし, これらの手法は通信遅延時間の分布が大きく変化する場合において十分に

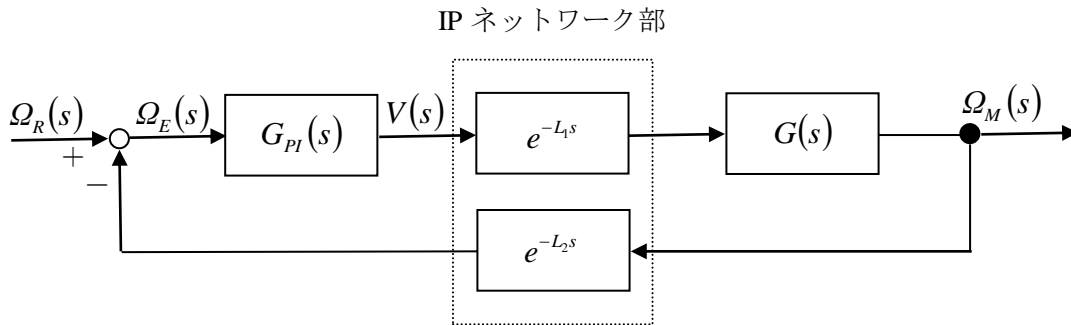


図 1 IP ネットワークを介した DC モータ遠隔速度制御システムの構成図
Fig.1 Configuration of speed control system for DC motor through IP network

表 1 DC モータの定数⁴⁾

Table1 DC Motor Parameters⁴⁾

Parameter	Description	Value
R_a	Armature resistant	4.67Ω
L_a	Armature inductance	0.17H
J	Moment of inertia	42.6×10^{-6} N·m·s/rad
B	Viscous-friction coefficient	47.3×10^{-6} N·m
K_T	Torque constant	0.147 N·m/A
K_E	Back-EMF constant	14.7×10^{-3} V·s/rad

対応していない。そのため、このような通信遅延時間の変化に対応する制御法が必要である。そこで本研究では、通信遅延時間の分布が大きく変化した場合を検出し、さらにその変化に応じた制御を行う制御法の開発を目的とする。

2. 制御システム

本研究では IP ネットワークを介した DC モータシステムを想定し、シミュレーショ

ンによって実験を行う。その DC モータ速度制御システムを図 1 に示す。ここで、 $\Omega_R(s)$ は目標回転速度[rad/s]、 $\Omega_M(s)$ は実際の回転速度[rad/s]、 $\Omega_E(s)$ は目標回転速度と実際の回転速度の偏差[rad/s]、 $V(s)$ は DC モータの印加電圧[V]である。また、 $G_{PI}(s)$ は PI 制御器の $G(s)$ は DC モータの伝達関数である。ここで e^{-Ls} はむだ時間であり、制御器から制御対象までのむだ時間およびその逆方向においてむだ時間が存在している。ただし IP ネットワークにおいては L_1 および L_2 は一定とは限らない。本研究では $L_1 = L_2$ と仮定する。また、本システムはサンプリング時間を 1ms とする。

DC モータの伝達関数を(1)式に示す。ここで、 R_a は電気子抵抗[Ω]、 L_a は電気子インダクタンス[H]、 J は慣性モーメント、 B は制動係数、 K_T はトルク定数[N·m/A]、 K_E は逆起電力定数[V·s/rad]である。

$$G_S = \frac{K_T}{(L_a s + R_a)(J s + B) + K_T K_E} \quad (1)$$

本研究ではモータの各種定数として文献 4) に示される DC モータのパラメータを用い

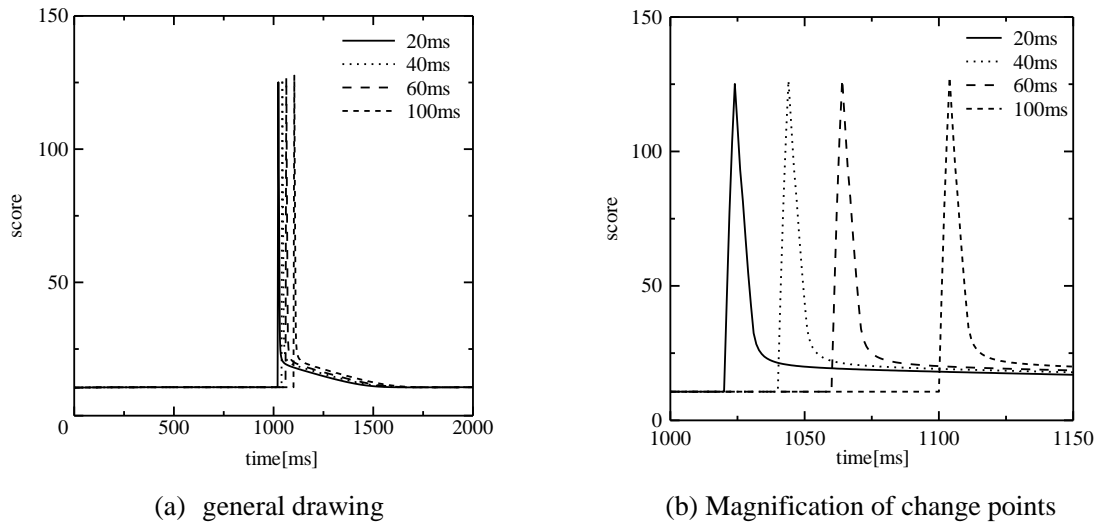


図2 一定の遅延時間の分布における変化点検出

Fig.2 A change point detection in constant delay time distribution

で実験を行った. 表 1 にそのパラメータを示す.

また, PI 制御器の伝達関数は以下のように(2)式で表される.

$$G_{PI}(s) = K_P + \frac{K_I}{s} \quad (2)$$

ここで, K_P および K_I はそれぞれ比例ゲイン, 積分ゲインを表している

3. 通信遅延時間の変化の検出に関する実験

実在の IP ネットワークの通信遅延時間の分布は変化する可能性がある. この通信遅延時間に応じて適切な制御を行わないとき, 制御性能が劣化する場合がある. そのためよりリアルタイムに通信遅延時間の変化を検出し, その変化に応じた制御が必要になる.

通信遅延時間の変化を検出するため, ネットワーク分野において使用されている変化点検出⁵⁾を用いる. これにより, 制御に用いるために, 通信遅延時間を適切に検出

できるかどうかの検討を行う.

本章では通信遅延時間が一定の場合および揺らぎを持つ場合の 2 通りの場合について実験を行う. なお, DC モータの目標回転速度 $\Omega_R(s) = 500 \text{ rad/s}$ とした. また, DC モータの駆動時間を 2000ms とし, その中間地点 1000ms において通信遅延時間の分布を切り替わる. これらの実験において, PI 制御器の制御ゲイン値として $K_P = 0.120$, $K_I = 0.264$ を用いる.

3.1 通信遅延時間の分布の変化検出

本研究では, 通信遅延時間の変化を検出するために, ウイルスなどによってトラフィックの時系列的振る舞い中の異変をリアルタイムに検知する ChangeFinder⁵⁾を用いた. これは忘却型 AR モデル(Autoregressive model)を用いて動作し, 1 サンプルずつ与えることで変化を score 値として逐次計算するようになっている. つまり, score 値が大きくなることは分布が変化したことを意味する. 本研究では文献 6) の ChangeFinder の

実装プログラムを用いた。ここで、各種パラメータはこのプログラムの初期設定の値をそのまま用いた。すなわち、忘却型 AR モデルの係数 $r = 0.5$ 、忘却型 AR モデルの次数 $order = 1$ 、外れ値 score を移動平均平滑化する場合の区間長 $smooth = 7$ とする。

3.2 一定の通信遅延時間の場合の検出実験

ここでは通信遅延時間の変化を検出し、その変化の大きさによって score 値にどのような影響が生じるのかを調べる。

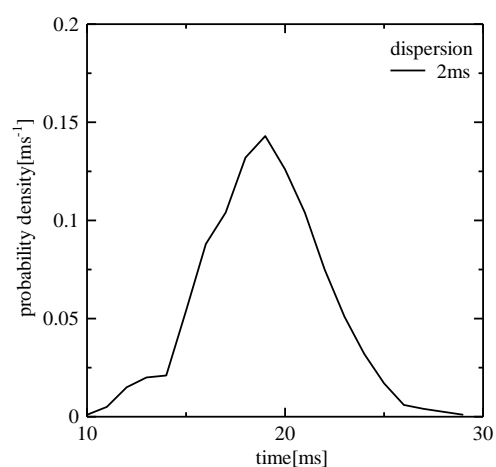
まず、前半および後半の分布が共に一定であるような場合においてシミュレーションを行った。なお、前半の分布は 10ms 一定、後半の分布はそれぞれ 20, 40, 60, 100ms 一定である。その結果を図 2 に示す。なお図中の実線は 20ms、点線は 40ms、破線は 60ms、短破線は 100ms の通信遅延時間の結果を表している。

結果として、遅延時間が変化した場合にはその変化を検出することが可能であることが分かった。しかし、変化した遅延時間の大きさが異なった場合において score 値に大きな差が見られなかった。ここから score 値は通信遅延時間の分布が変化した大きさには関係ないといえる

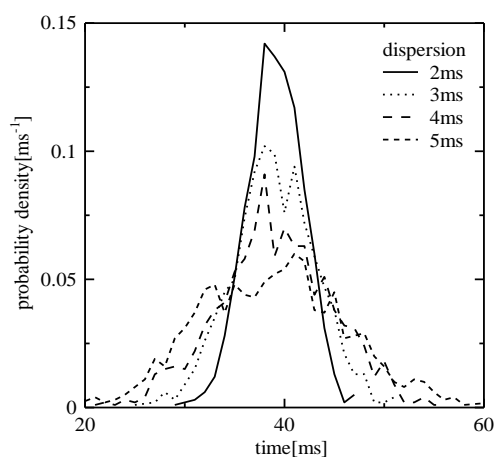
3.3 正規分布に従う通信遅延時間の場合

ここでは通信遅延時間の分布が一定ではなく、揺らぎを持つ場合を考える。その中で揺らぎによる score 値への影響を調べるため、分布として一般的な正規分布を持つ通信遅延時間を考える。

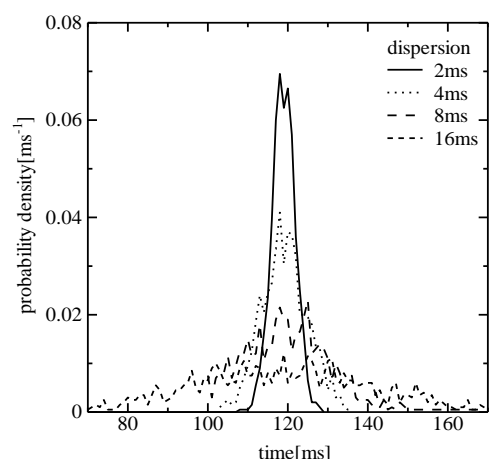
前半および後半の分布が共に正規分布で表わされる場合においてシミュレーションを行った。なお前半は各遅延に対して同様



(a) average 10ms



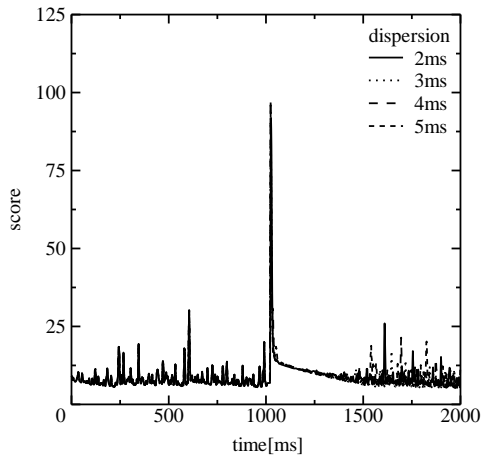
(b) average 20ms



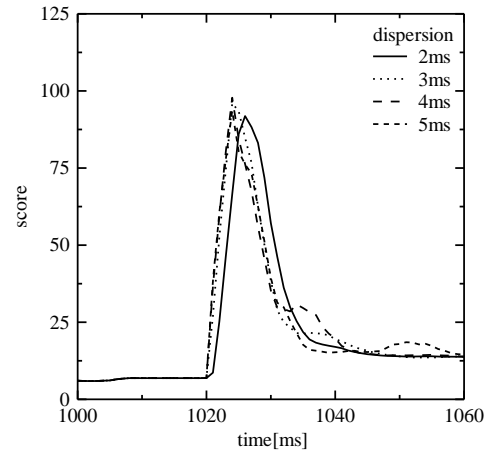
(c) average 60ms

図 3 通信遅延時間の確率分布

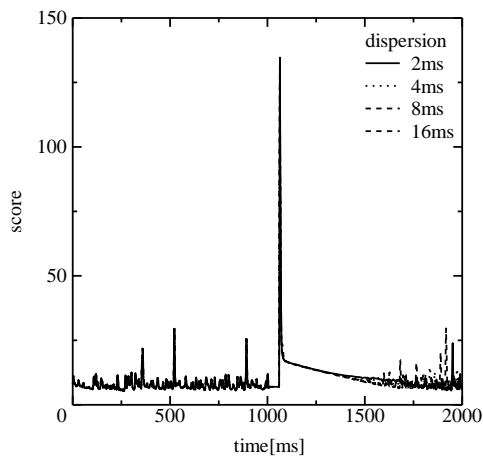
Fig.3 Normally distributed delay time distribution



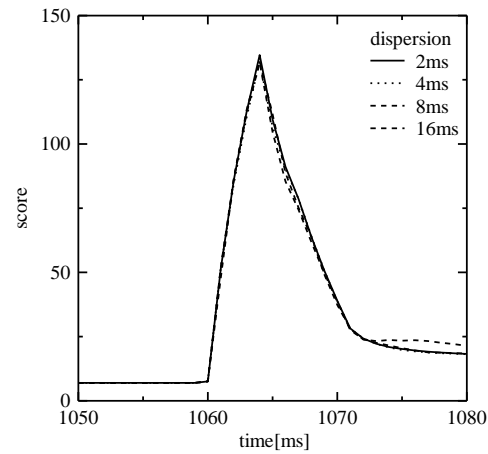
(a) general drawing in 20ms



(b) Magnification of change points in 20ms



(c) general drawing in 60ms



(d) Magnification of change points in 60ms

図 4 正規分布に従う遅延時間における変化点検出

Fig.4 A change point detection in normally distributed delay time distribution

に平均 10ms かつ分散 2ms の正規分布に従う分布を、後半は平均が 20ms かつ分散が 2,3,4,5ms および平均が 60ms かつ分散が 2,4,8,16ms の正規分布に従う分布を用いた。その分布を図 3 に示す。ここで図 3 の縦軸である確率密度は図ごとに縮尺が異なることに注意が必要である。

実験結果を図 4 に分布を切り替えた点の付近の拡大図を図 4(b), 4(d)に示す。なお図 4(a), 4(b)中の実線は 2ms, 点線は 3ms, 破

線は 4ms, 短破線は 5ms の分散を、図 4(c), 4(d)中の実線は 2ms, 点線は 4ms, 破線は 6ms, 短破線は 16ms の分散を持つ遅延時間の時の結果を表している。

結果として、後半の正規分布に関して、分散の大きさに対する score の大きさの変化は見られなかった。このことから正規分布に従うような通信遅延時間の分布に関して、score 値は通信遅延時間の揺らぎに対して影響を受けないことが分かった。

3.4 実験のまとめ

3.2 において通信遅延時間の変化割合による score 値への影響は小さく、3.3 において score 値は通信遅延時間の揺らぎに関係ないことが示された。このことから通信遅延時間の分布の変化点を検出することは可能であるが、その変化の大きさによって変化後の通信遅延時間の分布を知ることは難しいといえる。

4. 通信遅延時間の分布の変化に応じた制御に関する実験

4.1 通信遅延時間の分布の変化に応じた制御法

通信遅延時間の分布が変化する場合、制御をよりよく行うためには、その変化後の通信遅延時間をできるだけリアルタイムに知る必要がある。3 章において、score 値によって通信遅延時間の変化を検出することが可能であることが分かった。一方で、変化後の通信遅延時間の分布を知ることは難しいことがわかった。

そこで、これらの平均値をとることによって変化後の分布を推定した。本実験では score 値が 50 以上になった時に分布が変化したとみなし、その変化点付近の通信遅延時間のうち、変化点およびその前後における 3 つの通信遅延時間の平均値を用いた。これを変化後の分布の平均値とする。

以上のような対処法を用いて制御法について述べる。まず、常に ChangeFinder を用いてリアルタイムに score 値を計測し、分布の変化を検出する。検出した変化点付近における通信遅延時間を取得し、その平均をとることによって変化後の分布を推定する。

次に、通信遅延時間に応じて PI 制御器の

ゲインを調節する手法であるゲインスケジューリングを用いる。具体的には、あらかじめ通信遅延時間ごとに PI 制御器の制御ゲイン値を設定し、ゲインスケジューリングのテーブルから推定した往復通信遅延時間に対応する制御ゲイン値を選び、その値にチューニングする。ここで、本実験では通信遅延時間として往復通信遅延時間 (RTT: Round Trip Time) を用いる。これは制御器から制御対象へデータを送信してから、応答が帰って来るまでの時間である。

本実験では、往復遅延時間 100ms 時の制御ゲイン値を基準とし、以降 10ms ごとにゲインスケジューリングのテーブルを作成した。この際、ゲインスケジューリングの評価関数の 1 つである IAE (Integral of Absolute value of Error) を用い、各通信遅延時間において IAE 値が最小になるように制御ゲイン値を設定した。IAE は以下の式によって示される。

$$\int_0^{\infty} |\omega_E(t)| dt \quad (3)$$

表 2 に 100ms から 200ms までの制御ゲイン値テーブルを、図 5 実験に用いた制御ゲイン値のステップ応答のうち代表例として 120ms, 140ms, 160ms, 180ms を示す。ただし、表 2 中の L は $L = L_1 + L_2$ である。なお、実験においては、前半部分の分布における制御器ゲイン値として $K_p = 0.120$, $K_I = 0.264$ を用いている。

4.2 実験

ここでは、実験 I および II の 2 通りの場合において、本制御法と分布の変化に対して調整を行わない制御法で DC モータのス

ステップ応答波形をそれぞれ取得し、比較した。実験 I および II はそれぞれ DC モータが停止している場合から始動時に分布が変化する場合および、DC モータが駆動しているときに分布が変化する場合である。ただし、DC モータの駆動時間を 4000ms とし、1000ms 時に通信遅延時間の分布は切り替わる。また、前半の分布は平均 10ms 分散 2ms の正規分布に従う分布である。

実験 I

DC モータが停止している場合から始動時に分布が変化する場合、すなわち前半の分布における目標回転速度 $\Omega_R(s) = 0 \text{ rad/s}$ 、後半の分布における目標回転速度 $\Omega_R(s) = 500 \text{ rad/s}$ である。このとき、分布は平均 65ms 分散 6ms および平均 85ms 分散 8ms の正規分布に従う分布を用いた。前述の方法により、分布変化後の RTT の平均はそれぞれ 117ms, 157ms である。

実験 II

DC モータが駆動しているときに分布が変化する場合、すなわち前半の分布および後半の分布における目標回転速度 $\Omega_{RF}(s) = \Omega_{RS}(s) = 500 \text{ rad/s}$ である。このとき、分布は平均 75ms 分散 6ms および平均 95ms 分散 8ms の正規分布に従う分布を用いた。前述の方法により、分布変化後の RTT の平均はそれぞれ 135ms, 177ms である。

4.3 実験結果

結果、調整を行わない場合、実験 I および II は共に通信遅延時間が大きくなるにつ

れ振動大きくなっている。一方で本手法を用いた場合には振動の抑制が確認でき、ステップ応答は目標となる回転速度に収束しており、制御性能を改善できていることがわかる。

表 2 制御ゲイン値の実験条件

Table 2 Experiment condition of control gain value

Delay time[ms]	Gain
$95 \leq L < 105$	$K_P = 0.080, K_I = 0.260$
$105 \leq L < 115$	$K_P = 0.080, K_I = 0.213$
$115 \leq L < 125$	$K_P = 0.080, K_I = 0.165$
$125 \leq L < 135$	$K_P = 0.073, K_I = 0.124$
$135 \leq L < 145$	$K_P = 0.058, K_I = 0.110$
$145 \leq L < 155$	$K_P = 0.051, K_I = 0.100$
$155 \leq L < 165$	$K_P = 0.050, K_I = 0.096$
$165 \leq L < 175$	$K_P = 0.048, K_I = 0.092$
$175 \leq L < 185$	$K_P = 0.046, K_I = 0.087$
$185 \leq L < 195$	$K_P = 0.045, K_I = 0.082$
$195 \leq L < 205$	$K_P = 0.043, K_I = 0.079$

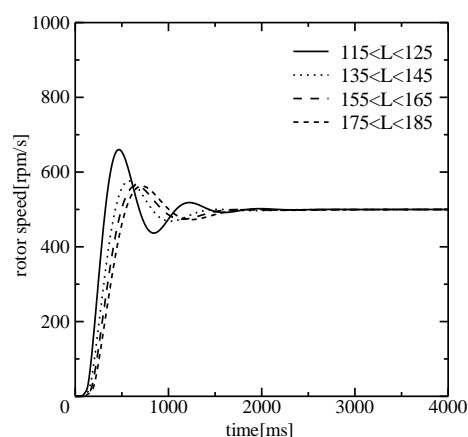
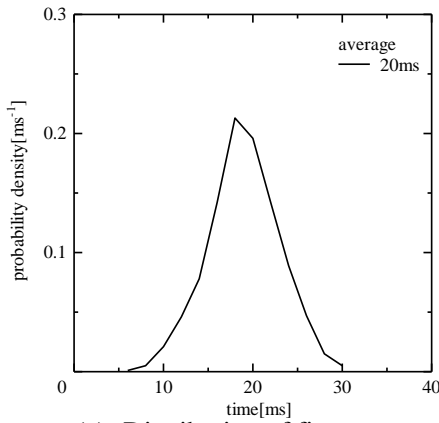
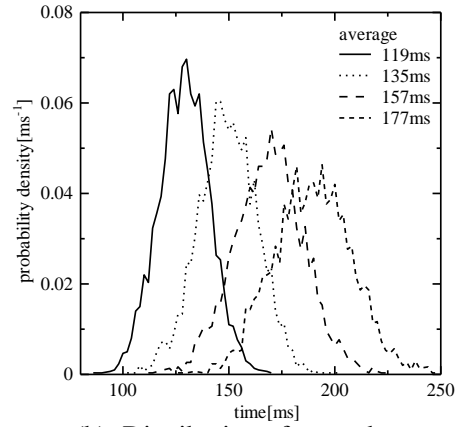


図 5 各制御ゲイン値のステップ応答

Fig.5 Each step response of control gain value



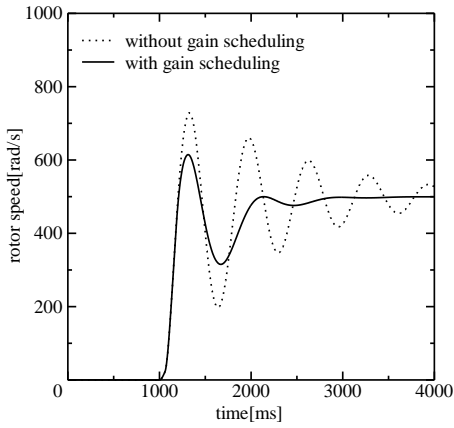
(a) Distribution of first part



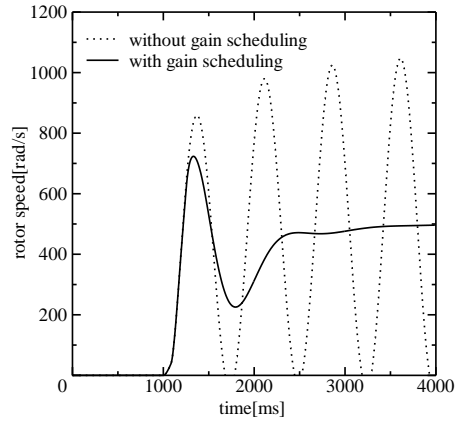
(b) Distribution of second part

図6 実験 I および II に用いた遅延時間分布

Fig.6 Delay time distribution in experiment I and II



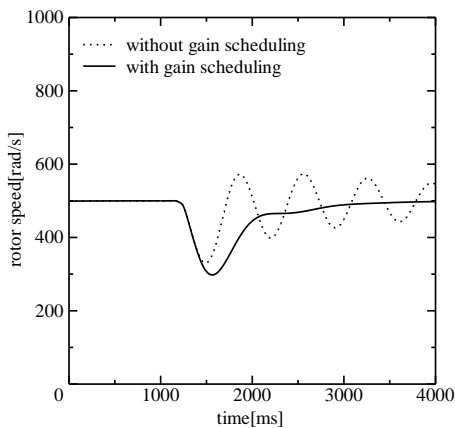
(a) average 119ms



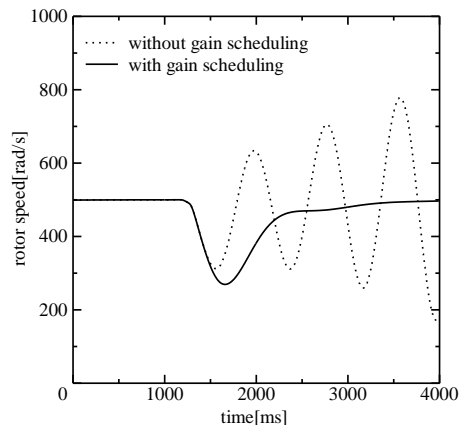
(b) average 177ms

図7 各通信遅延時間における実験 I

Fig.7 Experiment I in each means of delay time



(a) average 135ms



(b) average 177ms

図8 各通信遅延時間における実験 II

Fig.8 Experiment II in each means of delay time

4. おわりに

本研究では、IP ネットワークを介した DC モータの速度制御に関して、通信遅延時間の分布が大きく変化した場合、その変化に応じた制御を行う制御法の開発を目的とした。

3 章において、ChangeFinder を用いて通信遅延時間の変化を score 値として検出し、その変化に応じた制御を検討した。その結果、score 値は通信遅延時間の変化の大きさおよび通信遅延時間の揺らぎによる影響を受けないことが分かった。

また、4 章において、通信遅延時間の変化に応じる制御法を提案した。具体的には以下のようにした。まず、通信遅延時間の変化点を検出した。次に、変化点およびその前後の通信遅延時間を用いて変化後の分布の平均を求めた。最後に、各通信遅延時間における制御ゲイン値対してゲインスケジューリングを行った。結果として、通信遅延時間の分布が変化した場合に応じる制御法が改善できた。

今回の研究では ChangeFinder の各種パラメータを初期設定のまま用いているため、パラメータとして別の値を用いた場合に関して十分な検討がなされていない。また、4 章における制御法の改善は限られた条件のみでしか確認されていない。このため、今後の課題として、ChangeFinder のパラメータを変化させた場合における影響を調べ、より様々な通信遅延時間での検討を行う。

参考文献

1) R. A. Gupta and M.-Y. Chow: Networked Control System: Overview and Research Trends, IEEE Transaction on Industrial

Electronics, **57-7**, 2527/2535 (2010)
2) Y. Tipsuwan and M.-Y. Chow: On the Gain Scheduling for Networked PI Controller Over IP Network, IEEE Transactions on Mechatronics, **9-3**, 491/498 (2004)
3) K. Matsuo, T. Miura, T. Taniguchi: A Speed Control of Small DC Motor through IP Network Considering Packet Loss , Transactions on Electrical and Electronic Engineering, **2-6**, 657/659 (2007)
4) Y. Tipsuwan and M.-Y. chow: Fuzzy Logic Microcontroller Implementation for DC Motor Speed Control, in Proceedings of IEEE IECON 1999, 1271/1276
5) 山西 健司: データマイニングによる異常検知, 共立出版, 48/58 (2009)
6) ChangeFinder:
<http://argmax.jp/index.php?changefinder>