

IP ネットワークを介した DC モータ制御系の むだ時間推定法の開発

Development of a Dead Time Estimation Method for DC Motor Control System through IP network

○上岡本寛*, 松尾健史*, 三浦武*, 田島克文*

○Motohiro Kamioka*, 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),
むだ時間(dead time)

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 理工学研究科
松尾 健史, Tel. : (018)889-2332, Fax. : (018)837-0406, E-mail : matsuo@gipc.akita-u.ac.jp

1. はじめに

現在, 情報通信技術の発展により, 従来のコンピュータのみならず, 家電等多くのものがインターネットに接続されてきている. それに伴い, さまざまな応用技術が開発されているが, その応用の一つとして産業応用があり, インターネットすなわち IP ネットワークを介した遠隔制御が挙げられる¹⁾.

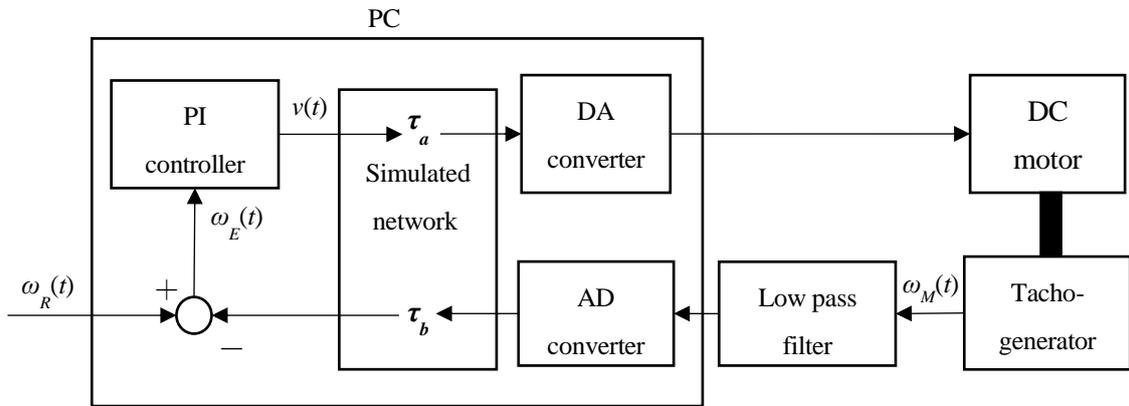
ここで, 制御対象の基本的なものとしてサーボ系が挙げられる. その系の中では, アクチュエータにサーボモータが用いられている.

そこで, サーボモータを制御しようとする場合, 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ため, 通信遅延時間が変動

し, 制御性能が劣化する問題がある¹⁾. この問題に対する制御法の 1 つとして, 通信遅延時間の変動に適応して PI パラメータをチューニングする手法があり, 例えば文献 1) では, DC モータ制御系において遅延時間が指数分布に従って変動するものとして近似し, それに基づいて PI パラメータのチューニングを行っている.

ここで, 現実のネットワークにおいて, 変動する遅延時間の分布は何らかの確率分布として近似できるといった報告がなされている. 例えば, よく近似に用いられる確率分布は, 指数分布²⁾であり, 他には正規分布³⁾あるいは対数正規分布⁴⁾がある.

さて, 制御系の設計をする場合, 変動する



$\omega_R(t)$: The reference speed [min^{-1}] $\omega_M(t)$: The rotor speed of the DC motor [min^{-1}]

$\omega_E(t)$: Error between the reference speed and the motor rotor speed [min^{-1}]

$v(t)$: Voltage value applied to the DC motor [V]:

図 1 IP ネットワークを介した DC モータ制御システムの構成図

Fig.1 Configuration of control system for a DC motor through IP Network

遅延時間を分布として扱うのではなく、一定の遅延時間すなわちシステムのむだ時間として近似できると制御系の設計に都合が良い。

文献 5)では、指数分布および対数正規分布に注目し、変動する遅延時間分布の第 1 四分位数を、システムのむだ時間として推定する方法が提案されている。しかし、この方法は指数分布の場合は有効であるが、対数正規分布の場合は、十分に近似できないという報告がなされている。

そこで本研究では、対数正規分布におけるむだ時間推定法の提案を行う。さらに、現実のネットワーク上の遅延時間に基づいてシミュレートされたネットワークのもとで、実際にサーボモータの一例として DC モータを駆動させ、その応答から本推定法が妥当か検証する。

2. 制御システム

IP ネットワークを介した DC モータ速度制

御システムの構成図を図 1 に示す。ここで、 τ_a および τ_b は、片道遅延時間を示す。ただし、この時間は変動する。

なお、実際のネットワークでは、トラフィック状況が時々刻々と変化し、同じ条件を確保することが難しいため、本研究では、PC 上のネットワークシミュレータで遅延発生をシミュレーションして実験を行う。

次に、実験システムの流れを示す。PC で目標回転速度および実際のモータの回転速度との偏差を PI 制御器に入力することで操作量である印加電圧値が計算され、それが、シミュレートされたネットワークを通り、DA 変換器によってアナログ信号へ変換され、DC モータに印加し駆動させる。DC モータには慣性負荷およびタコジェネレータが機械的に接続されており、タコジェネレータによって検出された回転速度は低域フィルタ、AD 変換器を介して PC へ取り込まれ、ネットワークを通り、PI 制御器にフィードバックされる。

表 1 DC モータの仕様

Table 1 Specification of DC motor

Rated output	11 W
Rated voltage	24 V
Rated current	1.25 A
Rated speed	3000 min ⁻¹

本システムのサンプリング時間は 1ms であり、各サンプリング時間毎に、最も新しく到着した制御信号を用いて制御を行う。

制御対象には山洋電気社製 DC サーボモータ R301T-011 を使用する。その仕様を表 1 に示す。タコジェネレータは 3V/1000 min⁻¹ のものを使用し、慣性負荷は $2.5 \times 10^{-5} \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2/\text{rad}$ のものを装着する。

また、PI 制御器の演算は次の(1)式となる。

$$v(t) = K_p \omega_e(t) + K_I \int_0^t \omega_e(\eta) d\eta \quad (1)$$

ここで、 K_p は比例ゲイン、 K_I は積分ゲインを表す。また、本研究では、以後 τ_a および τ_b が同じ分布であると仮定する。

3. むだ時間推定法

文献 5)より、指数分布に従って通信遅延時間が変動する場合、むだ時間はこの分布の第 1 四分位で近似できることが知られている。

しかし、対数正規分布に従って変動する場合、第 1 四分位数では十分な近似が得られない。

そこで本研究では、 τ_a および τ_b が対数正規分布に従って遅延時間が変動する場合、近似するむだ時間を実際に以下の手順で求める。

- I. 通信遅延時間が、平均値 τ_{avg} [ms] および標準偏差 τ_{sd} [ms] の対数正規分布に従って変動する場合、DC モータを駆動してステップ応答を取得する。

表 2 対数正規分布のパラメータ

Table 2 Parameters of log-normal distribution

Mean τ_{avg} [ms]	Standard deviation τ_{sd} [ms]
25	
50	5
75	10
100	15
125	20
150	25
175	
200	

- II. τ_a および τ_b が一定遅延時間 τ_c の場合、ステップ応答を取得する。

- III. 手順I, IIで求めた応答を次の式で評価する。

$$E = \int_0^t |\omega_{M_const}(\eta) - \omega_{M_dist}(\eta)| d\eta \quad (2)$$

ここで、 ω_{M_dist} がIの応答、 ω_{M_const} がIIの応答を表す。

- IV. τ_c の値を逐次変更しながら、 E が最小になるまで手順II, IIIを繰り返す。このとき得られる τ_c をシステムのむだ時間 τ_d とする。

手順IからIVを表 2 の τ_{avg} および τ_{sd} でそれぞれ行い、その結果求めたむだ時間 τ_c を図 2 に示す。

一例として、このうち対数正規分布が $\tau_{avg} = 100\text{ms}$ 、 $\tau_{sd} = 10\text{ms}$ の場合に、Iで得られた応答と手順IIからIVで求められたむだ時間 ($\tau_c = 88\text{ms}$) で駆動した結果の応答を図 3 に示す。これを見ると、2 つの応答は明らかに近くなっていることが分かる。

また、以上の結果を基に重回帰分析を用い

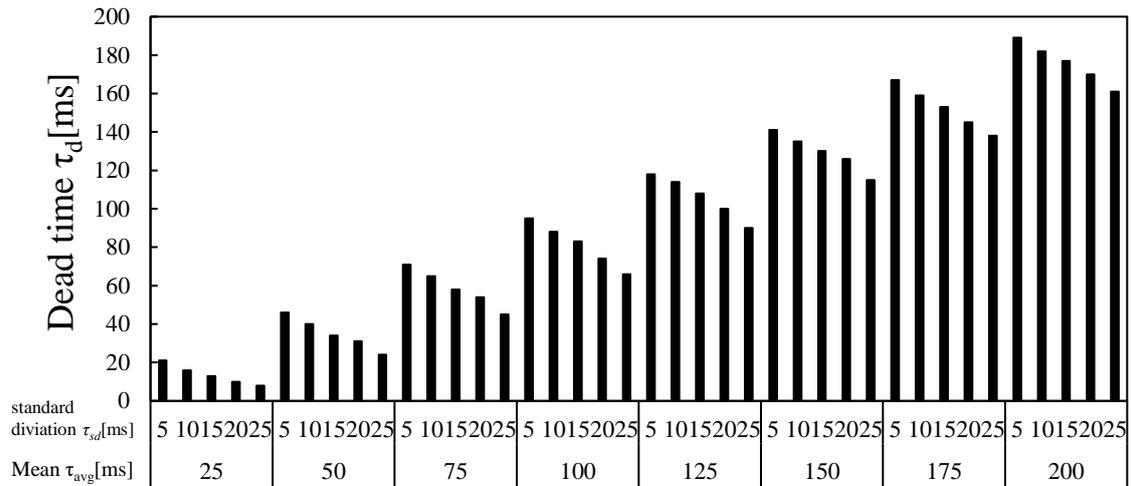


図2 対数正規分布のもとで駆動した場合のむだ時間
 Fig.2 Dead time in the case of driving under the log-normal distribution

てむだ時間推定式を次の式(3)のように求める.

$$\tau_d = 0.933\tau_{avg} - 1.23\tau_{sd} + 7.43 \quad (3)$$

これを用いて以下実験を行っていく.

4. 検証実験

前章では、対数正規分布の場合のむだ時間の推定法を提案した。また、指数分布においては、その分布の第1四分位数を用いて推定できる⁵⁾。本章では、この2つのむだ時間推定法が現実のネットワークの遅延分布のもとで、有効かを駆動実験により検証する。

4.1 実験方法

本実験では、現実のネットワークの通信遅延分布の例として、文献1)における Fig. 6 (b), (c), (d)の往復遅延時間分布を用いて、それぞれ図5 (a), (b), (c)の確率密度関数に従う乱数を作成し、これらの場合で検証を行う。なお、本実験では、便宜上片道遅延時間として、乱数の値

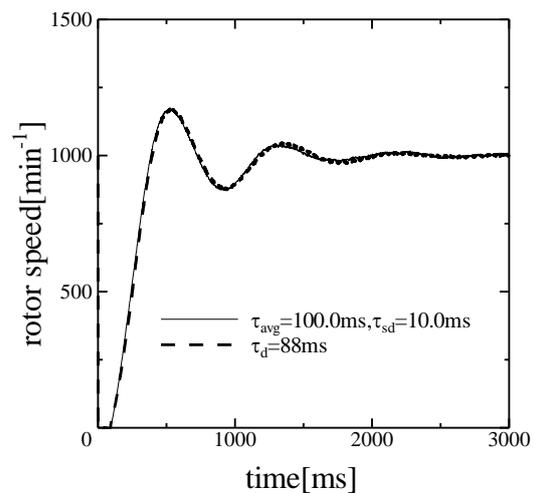


図3 ステップ応答の比較
 Fig.3 Comparison of step response

を半分にしたものを用いる。以下、本実験の手順を示す。

1. τ_a および τ_b が作成した乱数によって変動するとき、その第1四分位数を取得した後に、DCモータを駆動し、ステップ応答を取得する。以下この応答を A とおく。

表 3 使用した PI パラメータ

Table 3 Used PI parameters

Distribution	K_P	K_I
Fig.5(a)	0.01	0.08
Fig.5(b)	0.009	0.06
Fig.5(c)	0.002	0.008

- 前章と同様に式(2)における E の値が最小になる τ_c を求め、応答を取得する。
以下この応答を **B** とおく
- 分布の第 1 四分位数および式(3)で求めた値を一定遅延時間をそれぞれ τ_q および τ_d とした場合、各応答を取得する。以下これらの応答をそれぞれ **C**, **D** とおく。

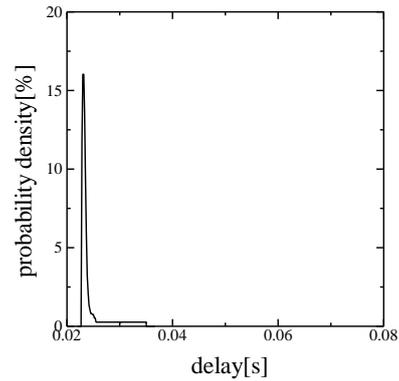
なお、本実験で設定した PI パラメータの値は表 3 に示す。

4.2 実験結果

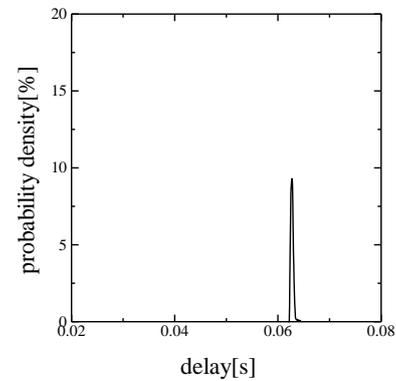
図 5(a), (b), (c)の分布のもとでの実験から得られた応答の比較を図 6 の(a), (b), (c)に示す。

図 6(a)および(b)を見ると、応答 A と応答 C の 2 つの応答はほぼ同じ波形となっていることが分かるが、応答 D との比較では、2 つの応答が異なる。ここで、応答 B は試行錯誤的に実際の分布に基づいて求めたむだ時間であるが、その応答 B と推定値に基づいて得た応答 C は同じむだ時間であることから第 1 四分位数でシステムのむだ時間が推定できると考えられる。ここで、2 つの分布においては、図 5(a),(b)の分布を見ても指数分布的に見えるので、本結果が妥当であると考えられる。

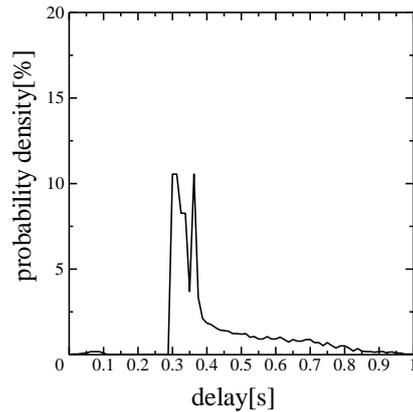
次に、図 6(c)を見ると、応答 A と応答 C との比較では、2 つの波形が大きく異なること



(a) Probability density function in the case of Fig.6(b) in ref.1)



(b) Probability density function in the case of Fig.6(c) in ref.1)



(c) Probability density function in the case of Fig.6(d) in ref.1)

図 5 使用した確率密度関数¹⁾

Fig.5 Used probability density function¹⁾

が分かる。一方、応答 D との比較では、2つの波形が似た波形となっていることが分かる。また、応答 B と応答 D ではほぼ同じむだ時間 ($\tau_d=111\text{ms}$, $\tau_d=110\text{ms}$)になることから図 5(c)の場合では、対数正規分布に従う場合のむだ時間推定法を用いることにより推定できることが分かった。

5. おわりに

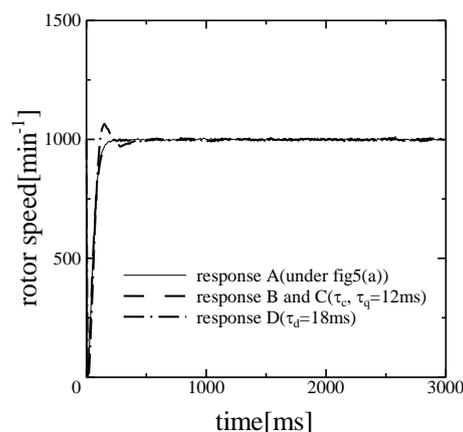
本研究では、対数正規分布におけるむだ時間の推定法を提案し、現実のネットワークを模擬したネットワークのもとで、実際のモータを駆動させ、推定法がこのシステムで妥当かどうかを現実の 3 つのネットワークの通信遅延時間分布を用いて検証した。

その結果、分布の第 1 四分位数か、本推定法のいずれかを用いるとシステムのむだ時間として妥当な推定が出来ることが分かった。すなわち、指数分布または対数正規分布に近似して、それに基づいた推定法を用いれば良いことが分かった。

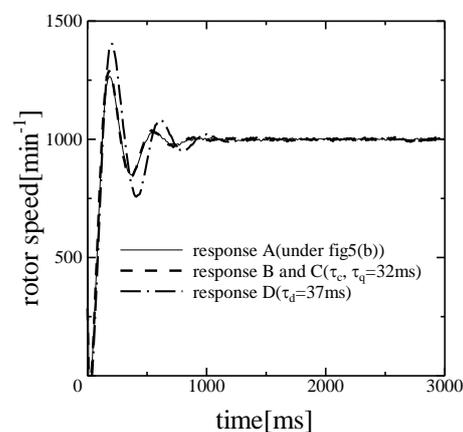
しかし、本研究では、3 つの分布でしか検証しておらず、他の分布でのさらなる検証が必要である。さらに、指数分布や対数正規分布を自動的に判別できるシステムの開発が今後の課題である。

参考文献

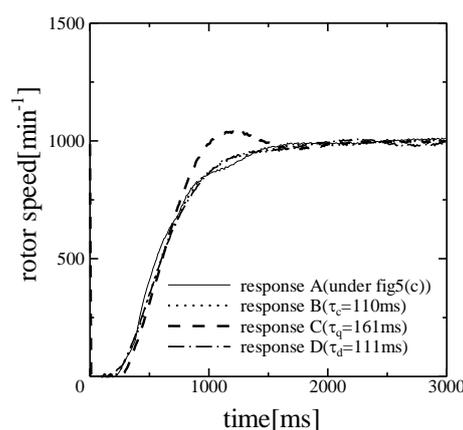
- 1) Y. Tipswan and M.-Y. Chow: Gain Scheduling Middleware: A Methodology to Enable Existing Controllers for Networked Control and Teleoperation-Part I: Networked Control, IEEE Control and Transactions on Industrial Electronics, **51-6**, 1218/1227(2004)
- 2) 汐月 哲夫: インターネットの遅延特性と双方向遠隔通信制御, システム制御情報学



(a) Step response in the case of Fig.5(a)



(b) Step response in the case of Fig.5(b)



(c) Step response in the case of Fig.5(c)

図 6 検証実験の結果

Fig.6 Results of verification experiment

- 会誌, **45-12**, 695/702 (2001)
- 3) 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)
- 4) S. Jabeen, M.B. Zafer, I.A. Qazi, and Z.A. Uzmi: SplitBuff: Improving the interaction of heterogeneous RTT flows on the Internet, 2013 IEEE International Conference on Communications, 2315/2319(2013)
- 5) 松尾 健史, 佐藤 諒, 上岡 本寛, 三浦 武, 田島 克文: IP ネットワークを介した小形 DC モータ制御系の通信遅延時間に基づく PI パラメータのチューニングに関する一検討, 秋田大学大学院理工学研究科研究報告, **37**, 37/38(2016)