

LAN ネットワークを用いたモータ制御

Motor Control using LAN Network

○松尾 健史*, 秋山 宜万*, 三浦 武*, 谷口 敏幸*

○Kenshi Matsuo*, Yoshikazu Akiyama*, Takeshi Miura* and Toshiyuki Taniguchi*

*秋田大学

*Akita University

キーワード: DC モータ (DC motor), 制御システム (control system), LAN ネットワーク (LAN network), TCP/IP (TCP/IP), 通信遅延 (time delay)

連絡先: 〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1 秋田大学 工学資源学部 電気電子工学科 制御システム工学講座
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

インターネットに代表される情報通信技術の急速な発展は、私たちの生活に大きな変化をもたらしている。現在、日本では多くの人が携帯電話やブロードバンドと言われる高速回線を利用し、インターネットに接続している。これらにより、どこにいても容易に情報のやりとりが出来るようになった。インターネットは全世界的巨大ネットワークであるが、そのネットワークを細かく分けると LAN (Local Area Network) と呼ばれる限られた範囲のネットワークになる。その LAN 同士が相互に結びつくと、WAN (Wide Area Network) が形成される。インターネットとは、WAN が世界規模で実現されたネットワークといえる。このように、LAN はインターネットの根幹をなしている最小規模のネットワークである。現

在、LAN は Ethernet とインターネットのプロトコルである TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol) を用いて構築することが最も一般的になっている。このため、コンピュータのみならず、家電、計測器などにも LAN ポートが搭載された機器が多くなってきている。

このように、さまざまな機器を LAN という 1 つのネットワーク上に接続できるということは、制御分野においても非常に魅力的である。例えば、各種計測器と制御用コンピュータを LAN につなげば、簡単に 1 つの制御システムを構築できるのではないか。また、別の制御システムを LAN につなげば、つないだ先のシステムも制御できるのでないか。さらには、インターネットに接続すれば、インターネットに接続されているあらゆるシステムの

制御ができるのではないかなど、限りなく拡大が可能と考えられる。しかし、もともと LAN は制御用ネットワークとして想定されていないため、そのまま利用しようとするといくつか問題が考えられる。最大の問題は、TCP/IP はパケット通信方式であるため通信時間が変動することや、ネットワークの負荷状況によってパケットが損失することである。当然、これらは従来の制御システムでは想定されていない事項である。

ネットワークを用いた制御に関して、双方向遠隔制御システムに関する研究では、活発に研究が行われている(例えば解説として文献 1) 2))。一方、ネットワークを用いたモータ制御システムの制御法を議論した文献に関しては、少し見られる程度³⁾⁻⁵⁾である。文献 3) 4) では、インターネットを介した DC モータの速度制御を行うとき、現状のネットワーク通信状況を計測し、そのデータを基に、ネットワークの通信時間が指数分布に従って変動するものとして通信時間を予測し、その予想した通信時間に従って PI 制御器のゲインを適宜変える方法、すなわち、PI パラメータを通信時間に基づきゲインスケジューリングした方法で速度制御を行っている。文献 5) では、ネットワーク部を PC 上でシミュレートした擬似的ネットワークを介した DC モータの速度制御システムを考え、ネットワークの通信時間が、一様分布、正規分布、指数分布に従って変動する場合、制御システムにどのような影響があるかを調べた。結果として、通信時間の分布と制御性能の間にあまり関連性は見

られず、むしろ通信遅延時間の長さとの関係が大きいという知見が得られている。

本研究は、インターネットのような大規模ネットワークを想定するのではなく、LAN のような限定的なネットワークを介した小形 DC モータ速度制御のシステムを実際に構築し、その制御性能について検討したものである。

2. LAN を利用した制御システム

Fig.1 に一般的なフィードバック制御システムのブロック線図を示す。また、Fig.1 の具体例として、本研究で対象とする DC モータ速度制御システムの概略図を Fig.2 に示す。図に示すように、制御部(Controller)に PI 制御器(PI Controller)を採用した。Fig.1 の一般的なフィードバック制御の流れは、まず目標値(Reference)を適当に与えたとき、検出部(Sensor)から得られる値 (⑤) との差 (①) を計算し、それを制御部に入力する。それに基づき、制御部は制御アルゴリズムに従い計算し、駆動部(Actuator)へ印加する (②)。そして、負荷(Load)が取り付けられている駆動部が駆動し、駆動結果 (④) が出力される。これが、検出部によって検出され、検出値 (⑤) が制御部にフィードバックされる。フィードバックされれば、再び目標値との差を計算し、以下同様の計算を繰り返す。

Fig.2 の DC モータ速度制御システムでは、駆動部に該当する部分には、DA 変換器(必要ならば変換器を制御するコンピュータ)と DC モータが含まれる。

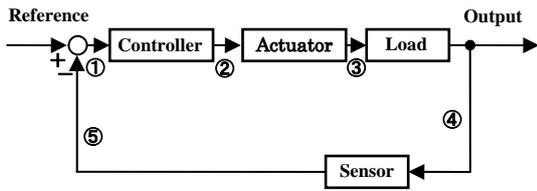


Fig.1 Block diagram of a typical feedback control system

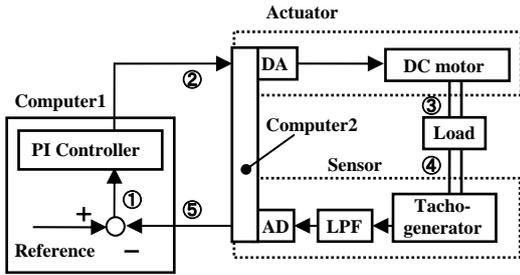


Fig.2 Schematic diagram of a speed control system for a DC motor

検出部に該当する部分には、タコジェネレータ、低域フィルタ(LPF)、そして、AD変換器(必要ならば変換器を制御するコンピュータ)が含まれる。また、Fig.1の目標値と⑤の差の計算や、制御によりなされる計算は、Fig.2ではコンピュータ上ですべて処理される。このようにFig.2のシステムをコンピュータ部、駆動部、検出部、および負荷という4つに分けたとき、Fig.2の①はコンピュータ上の処理であり、②⑤はケーブルあるいはコンピュータの拡張バスにより接続され、③④は機械的に接続されている。このうち②⑤はデジタル信号を伝送する通信路であるが、制御分野ではRS232CやGP-IBなどのケーブル接続か、あるいは、コンピュータの拡張バスならばISAやPCIで接続されており、信号の転送方式はパラレル転送方式、あるいは、シリアル転送

方式で伝送する。これらの通信路は通信距離が短いため、通信時間を無視して制御システムを考えてきた。

さて、近年インターネットに代表される情報通信技術の発展により、これらの技術を用いれば通信距離を無限に伸ばすことができ、EthernetとTCP/IPプロトコルを組み合わせ、LANを組む方式が一般的である。本研究では、この②⑤をLANで接続された制御システムで考える。しかし、このLANは制御システムで利用することは想定されてないため、現実の制御システム上で使えるか確認する必要がある。

TCP/IPプロトコルはデータを小さなまとまりに分割して送受信する。これはパケット通信と呼ばれる方式である。このため、通信路の混雑状況により、通信時間が変動することや、パケット自体が喪失してしまうことが起こる。また、当然のことながら、通信距離が伸びれば通信時間が無視できなくなる。LANネットワークを導入すると、Fig.1はむだ時間の表現を利用して、Fig.3のように表現される。ただし、通信時間は一定ではないので、 L_1 と L_2 は定数でない。

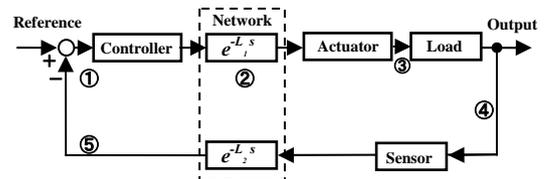


Fig.3 Block diagram of a feedback control system include LAN network

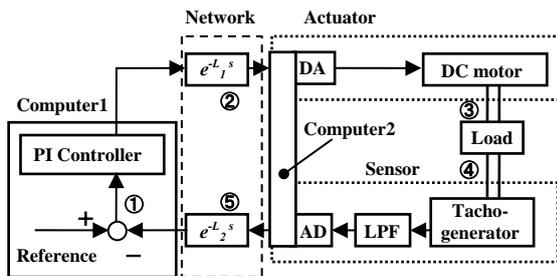


Fig.4 Schematic diagram of a speed control system for a DC motor using LAN network

同様に, Fig.2 を LAN ネットワーク使ったシステムで記述すると, Fig.4 のようになる.

以下, Fig.4 の DC モータ速度制御システムで実験を行っていく.

3. 実験システム構成

今回のシステム (Fig.4) において使用した DC モータの仕様を Table1 に示す. タコジェネレータは $3V/1000\text{min}^{-1}$ のものを使用した. Computer1, Computer2 の仕様は Table2 で示されている PC/AT 互換のパーソナルコンピュータを用いた. また, Computer2 には DA・AD 変換器が取り付けられている. また, Computer1, Computer2 ともにサンプリング時間は 1ms である. また, 負荷は慣性モーメントが $3.5 \times 10^{-5} \text{kg}\cdot\text{m}^2$ である慣性負荷を使用した. ローパスフィルタは 1 次で時定数 0.1ms のパッシブフィルタを用いた.

次に, Fig.4 をブロック線図で表すと Fig.5 となる. ここで, DC モータの速度制御をするため, $R(s)$ は目標速度 $[\text{min}^{-1}]$, $\Omega(s)$ は実際駆動しているモータの回転速度 $[\text{min}^{-1}]$, $E(s)$ ($E(s)=R(s)-\Omega(s)$)は目標速度と実際の速度との

偏差とする. また, $U(s)$ は電圧指令値 $[\text{V}]$ である. また, $G_c(s)$ は PI 制御器の伝達関数であり,

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

である. $G_p(s)$ は操作部, 負荷, 検出部を表しており, 入力 $U(s)$ と出力 $\Omega(s)$ の伝達関数である. 本研究では, 目標速度を 1000min^{-1} とする. また, 比例ゲインを $K_p=0.020$, 積分ゲインを $K_I=0.110$ とする.

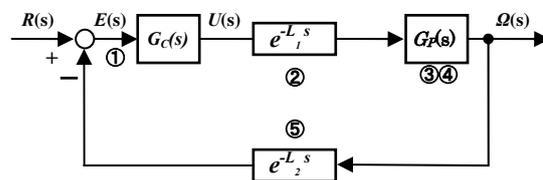


Fig.5 Block diagram of a speed control system for DC motor using LAN network

Table1 Rated values of the DC motor

rotor inertia	$1.86 \times 10^{-6} \text{kg}\cdot\text{m}^2$
rated voltage	24V
rated current	1.25A
rated motor speed	3000min^{-1}

Table2 Specification of the computers

Computer1	Computer2
CPU 2.53GHz	CPU 865MHz
Memory 1.0GBytes	Memory 256MBytes
OS Vine Linux 3.1	OS Vine Linux 3.2

4. LAN 構成を変えたときの制御性能の変化

本研究では, 前述した制御システムで, LAN

の構成を後述の(0)-(6)の設定にして、それぞれ DC モータ速度制御実験を行った。

Computer1 と Computer2 には 100Mbps の NIC(Network Interface Card)が装着されている。Computer1, Computer2 とも非同期で、サンプリング時間 1ms ごとに制御演算が処理される。Computer1 上では、まず Computer2 より送信された回転速度の値を受信し、目標値と回転速度の差を取る (Fig.4 の①)。次に、PI 制御器でモータに印加する指令値を計算し (Fig.4 の②)、UDP プロトコルで Computer2 へ送信する。このとき、サンプリング時間 1ms のうち、0.5ms 間回転速度信号の受信待ちして、その間に Computer2 から信号が来なければ、パケット損失として、前のサンプリング時の回転速度を用いて PI 制御器の演算を行う。

一方、Computer2 は Computer1 から送信されて来た印加電圧指令値を受信し、DA 変換器を用いて DC モータに電圧を印加する。ここで、Computer1 の場合と同様、0.5ms 間印加電圧指令値信号の受信待ちをし、その間に Computer1 より信号が到着しなければ、パケット損失と見なし、前のサンプリング時と同じ電圧を印加する。次に、モータの回転速度は AD 変換器を通して Computer2 が計測し、この値を UDP プロトコルで Computer1 へ送信する。

さて、ここで注意すべきこととして、TCP/IP プロトコルには、TCP プロトコルと UDP プロトコルがあるが、UDP は TCP と違い、受信側にパケットが届いたかどうか、送信側が確認することができないことがある。また、受信

側が受信待ちをしている時間は、サンプリング時間 1ms に対して 0.5ms であるため、もしタイミングがずれ、受信待ちでないときに、送信側がパケットを送信して来たときはパケットが損失することになる。

次に、LAN の構成(0)-(6)について述べる。

(0) LAN を使わない場合

(Fig.2 のように LAN を介さない従来の制御システム.)

(1) NIC 同士が直接接続されている場合

(Fig.6 のように、Computer1 と Computer2 が 1 本の LAN 用クロスケーブルにより接続されている.)

(2) 1 台のスイッチングハブを介して接続されている場合

(Fig.7 のように、通信速度が 100Mbps であるスイッチングハブを介して Computer1 と Computer2 が接続されている.)

(3) 2 台のスイッチングハブを介して接続されている場合

(Fig.8 のように、通信速度が 100Mbps であるスイッチングハブを 2 台介して Computer1 と Computer2 が接続されている.)

(4) 1 台のルータを介して接続されている場合

(Fig.9 のように、通信速度が 100Mbps であるブロードバンドルータを介して Computer1 と Computer2 が接続されている。なお、ルータは、WAN 側に Computer1, LAN 側に Computer2 が接続されている.)

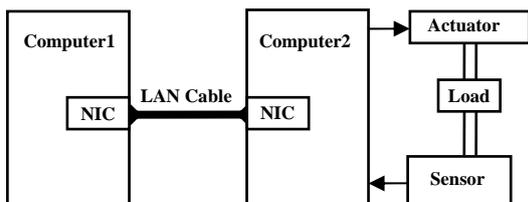


Fig.6 Schematic diagram of a speed control system for a DC motor using LAN network connected directly between Computer1 and Computer2

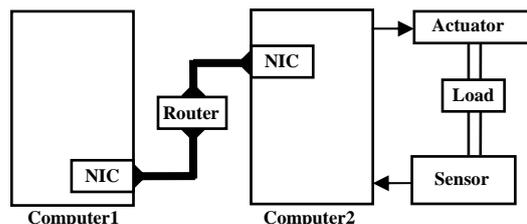


Fig.9 Schematic diagram of a speed control system for a DC motor using LAN network connected through a broadband router between Computer1 and Computer2

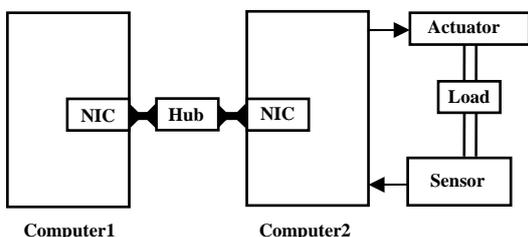


Fig.7 Schematic diagram of a speed control system for a DC motor using LAN network connected through a switching hub between Computer1 and Computer2

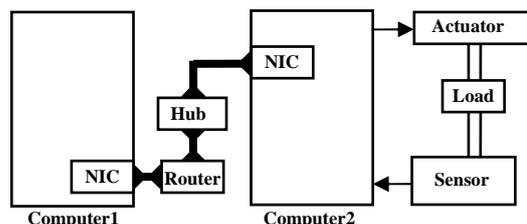


Fig.10 Schematic diagram of a speed control system for a DC motor using LAN network connected through a broadband router and a switching hub between Computer1 and Computer2

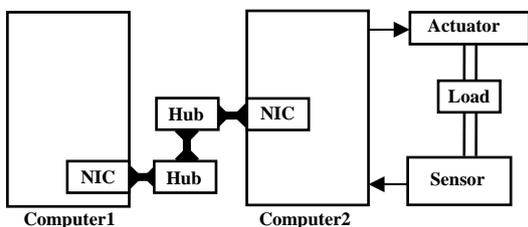


Fig.8 Schematic diagram of a speed control system for a DC motor using LAN connected through two switching hubs between Computer1 and Computer2

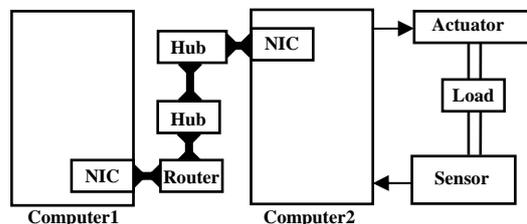


Fig.11 Schematic diagram of a speed control system for a DC motor using LAN network connected through a broadband router and two switching hubs between Computer1 and Computer2

(5) 1台のルータと1台のスイッチングハブを介して接続されている場合

(Fig.10のように、通信速度が100Mbpsであるルータとスイッチングハブを介してComputer1とComputer2が接続されている。WAN側にComputer1, LAN側に

Computer2が接続されている。また、ハブはLAN側に接続されている。)

(6) 1台のルータと2台のスイッチングハブを介して接続されている場合

(Fig.11のように、通信速度が100Mbpsである1台のルータと2台のスイッチング

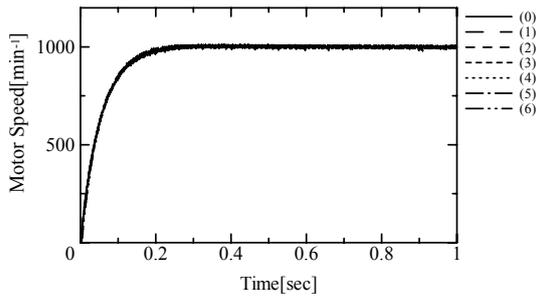


Fig.12 Step responses of a DC motor speed control not using LAN network and the controls using the various networks.

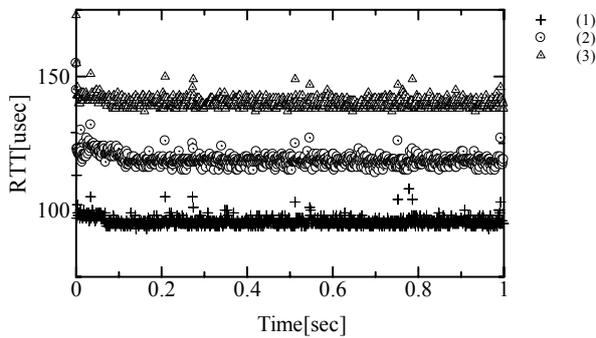


Fig.13 RTT to each sampling time in case of (1) to (3).

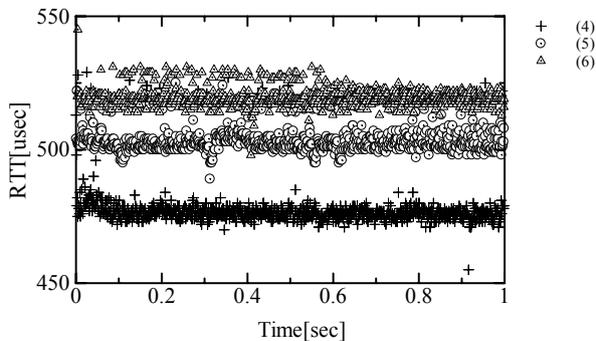


Fig.14 RTT to each sampling time in case of (4) to (6).

ハブを介して Computer1 と Computer2 が接続されている場合。なお、ルータは WAN 側に Computer1，LAN 側に Computer2 が接続されている。また、2 台のハブは LAN 側に接続されている。）

Table3 Number of lost packets in case of (1) to (6)

Case	Number of lost packets
(1)	0
(2)	0
(3)	0
(4)	30
(5)	104
(6)	207

(1)-(6)の場合で速度制御実験を行ったとき、それぞれの応答波形を Fig.12 に示す。次に、(1)-(3)のときの RTT(Round Trip Time)を Fig.13、(4)-(6)の RTT を Fig.14 に示す。ここで RTT とは往復遅延時間のことであり、一般的には、例えば 2 つのコンピュータ A, B 間で通信するとき、パケットを A から B へ送り、B が受信したら、B から A へ送り返し、再び A が受信するまでの時間である。本研究では、あるパケットが Computer2 から Computer1 へ送信され、Computer1 が受信したら、Computer1 から Computer2 へ返信され、再び Computer2 が受信するまでの時間と定義する。

Fig.13 で示されているように、LAN ネットワークにハブを 1 台増やすごとに、約 20μsec 通信時間が増加することが分かる。また、Fig.14 で分かるように、LAN ネットワークにルータが入ると約 500μsec 通信時間が増加する。さらに、ルータに加えハブを 1 台増やすごとに約 20μsec 通信時間が増加することが分かる。また、Table3 で示されているように、ルータが入る((4))ではパケット損失が現れており、ハブが追加される((5),(6))では、パケット損失がさらに多くなっている。

Fig.12 で分かるように、いずれの場合も従来の制御である(0)の応答波形に比べて、(1)-(6)の応答波形に違いは見られない。本研究で実験システムのサンプリング時間は1msであり、RTTより大きい値のため、影響が現れていないと考えられる。このように、サンプリング時間が1ms~100ms程度の制御システムであれば、十分制御に利用できる。

応答波形には差はまったく現れてないため、(4)-(6)で起こったパケット損失程度では、制御システムにほとんど影響を与えていないことが分かる。

5. まとめ

本研究では、LANネットワークを構築し、そのネットワークを介したDCモータ速度制御実験を行った。LANネットワークの構成は、2台のコンピュータ間をLANケーブルで直接接続する場合、スイッチングハブを1台、および、2台を介して接続する場合、また、ブロードバンドルータを1台介して接続する場合、そのルータに加え、さらにスイッチングハブが1台、および、2台介して接続する場合となっている。それぞれの場合で実験を行った結果、どの場合でもLANネットワークを介さない従来の制御の場合に比べても、応答波形に差がないことが分かり、本研究で構築したLANネットワークの仕様では、十分制御システムとして利用できることが分かった。RTTより長いサンプリング時間であれば、制御システムが構成できることが本研究で確認された。

参考文献

- 1) 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，**45-12**，695/702(2001)
- 2) 汐月哲夫：インターネットを介した双方向遠隔制御における伝達遅延問題，計測と制御，**41-7**，507/512(2002)
- 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 Trans. Ind. Electron., **51-6**, 1218/1227 (2004)
- 4) Y. Tipsuwan, M.-Y. Chow and R. Vanijjirattikhan: An Implementation of a Networked PI Controller over IP Network, Proc. IEEE IECON'03, 2805/2810 (2003)
- 5) 松尾健史，三浦武，谷口敏幸：ネットワークと小形モータの制御，電気学会回転機研究会，RM-05-164(2005)