

ニューラルネットワークを用いたステッピングモータの閉ループ制御

Closed-Loop Control of a Stepping Motor Using Neural Network

○ 伊藤 孝一, 三浦 武, 秋山 宜万, 谷口 敏幸

○ Koichi Ito, Takeshi Miura,

Yoshikazu Akiyama, Toshiyuki Taniguchi

秋田大学

Akita University

キーワード; ステッピングモータ(steping motor), センサレス(sensorless),

リアルタイム角度検出(real-time detection of rotor angle),

ニューラルネットワーク(neural network), 進み角制御(lead angle control),

連絡先: 〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1 秋田大学工学資源学部 電気電子工学科
三浦 武, TEL:(018)889-2329, FAX:(018)837-0406, E-mail:miura@ipc.akita-u.ac.jp

1. はじめに

ステッピングモータは、外部からの入力信号により直接開ループで制御ができ、制御系全体が比較的簡単に低コストで構築できるという特徴を有している。このため今までは、この特徴を生かして開ループ制御系において運用されることがほとんどであった。これに対して、より高度な制御が要求される場合には閉ループ制御系で構築される¹⁾²⁾³⁾。

閉ループ制御系では回転子の位置情報または速度情報を得て電気信号に変換するためのセンサを必要とする。通常、ポテンシオメータやロータリーエンコーダ、タコジェネレータなどがそのセンサとして用いられるが、これにより制御系全体の低コスト化の障害になる。この問題を解決するために、モータにセンサを取り付ける代わりに、その現在位置をモータの励磁電流などによって検知する手法が提案されて

いる⁴⁾。

そこで、本研究ではモータの励磁電流に注目して回転子角度の検出を行っている。この検出においては、ニューラルネットワークを用いている。これは、モータの励磁電流と回転子角度のような入出力関係を非線形写像として取り扱うことができるため、制御対象やそれを含む制御系全体のモデリングが不要となるためである。これにより、系の構造や機構に関する先験的な情報がない場合などのモデリングが困難な場合においても対応できる。

以上のような事実を踏まえて、本研究ではニューラルネットワークをオブザーバとして用いることによりセンサレスでリアルタイムに回転角度を検出し、これにより進み角制御²⁾³⁾を行うことで、開ループ制御時において脱調する領域においても安定した駆動を行えることを目的とした制御系を構築する手法を提案する

ものである。

ここで、本研究ではモータ単体に対してではなく、ベルト駆動のリニア移動用スライダユニットに関して実験を行っている。また、励磁方式は2相励磁である。

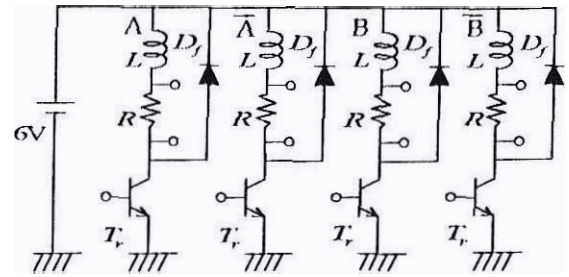
2. 実験システム

本システムにおいて使用したステッピングモータは、2相ハイブリッド形、基本ステップ角 1.8deg 、定格電圧 4.0V 、定格電流 2.0A のものである。このモータはバイファイラ巻線を有している。ただし、後述するように、駆動回路には励磁電流検出用の抵抗 $R(1\Omega)$ を接続している。これにより、いくらかの電圧降下が生じるために、それを補うために駆動回路の電源電圧を 6V としている。

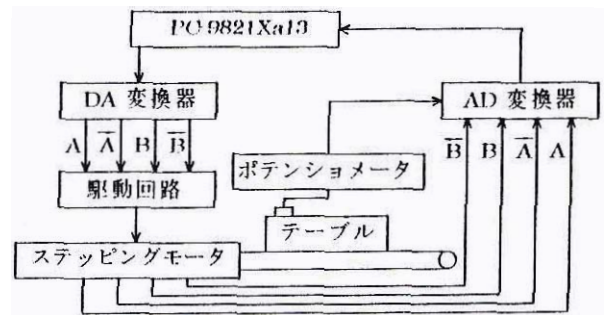
本研究で用いた実験システムを図1に示す。図1(a)は駆動回路であり、ユニポーラ駆動形の電圧スイッチング回路となっている。ここで、抵抗 R は各相に流れる励磁電流を検出するために、励磁巻線と直列に接続されている。図1(b)は実験装置の構成である。パーソナルコンピュータ(PC9821Xa13)からステッピングモータの各相への励磁指令は、DA変換器を介して、駆動回路に出力され、モータが駆動される。モータの回転軸はプーリに連結されており、その回転によってタイミングベルトが動くことによりテーブルが移動する。テーブル位置はポテンシオメータ (2V/cm) によって検出され、AD変換器を介して、コンピュータへ入力される。本システムにおけるサンプリング時間は 0.5ms である。

ここで、本システムにおいては、1ステップ毎にテーブルが 0.0379cm 移動する。

本研究では、負荷の変更に対するオブザーバの有効性を検討するために、モータの振動特性に大きな影響を与える慣性負荷を用いて様々な異なった駆動条件下で実験をしている。このことを示しているのが表1である。case1からcase3は後述するようにニューラルネットワ



(a) 駆動回路



(b) 実験装置の構成

図1 実験システム

表1 駆動条件

	テーブル上の慣性負荷の重さ
case1	無負荷
case2	1.0kg
case3	2.0kg
case4	1.5kg
case5	4.0kg

ークの学習に用いた教師データを取得したときと同一の駆動条件、case4は負荷の重さが教師データを取得したcase2とcase3の中間の駆動条件、case5はcase3の2倍の駆動条件である。ただし、このとき付加物はテーブル上に取り付けられている。

3. 進み角制御

進み角制御は、ステッピングモータの閉ル

ブ運転における重要な概念の1つである。図2はその概念を示している。回転子の磁極をS極として話を進めていく。まず、B相を励磁してN極とし、回転子の位置がB相のトルク平衡点に移動したとする。次にA相を励磁すると、A相からの吸引力により回転方向のトルクが発生する。ここで、回転子の位置がA相に到達する前に、ある特定の角度となったときにB相に励磁を切替える。これによりB相からの吸引力および慣性によって回転方向にトルクが得られる。

このように、進み角制御とは加速トルクを大きくし、高速領域まで駆動させることができる制御方式である。ここで、図2における θ_f は進み角である。

4. ニューラルネットワークオブザーバの構築

本研究におけるニューラルネットワークオブザーバは、ステッピングモータのセンサレス角度検出のために駆動回路への励磁指令信号およびモータの励磁電流の値を用いて回転角度の値を推定する形で構成されている。ニューラルネットワークの使用に際しては、両者の関係をあらかじめオフラインで学習させたものを用いている。本研究では、この学習法として極めてよく知られた Back Propagation 法⁵⁾を用いている。

ところで、ステッピングモータは入力パルス数をカウントすることにより、モータ駆動時の回転子角度の最終停止位置 θ_{ref} は既知の値として扱うことができる。これより、オブザーバの出力である回転子角度は、現在時刻 t の励磁相における最終停止位置となる角度を基準とした相対位置で表され、その値は $\theta(t) - \theta_{ref}(t)$ となる。よって、 $\theta(t)$ はある現在時刻 t における実際の回転子角度である。ここで、オブザーバの出力を上述のようにしたのは、回転子角度を累積値とした場合には、回転子角度が有限の範囲に収まらなくなるためニューラルネットワークの学習が困難になるとためである。

回転子

回転子

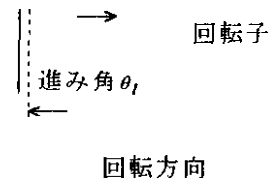


図2 進み角の概念

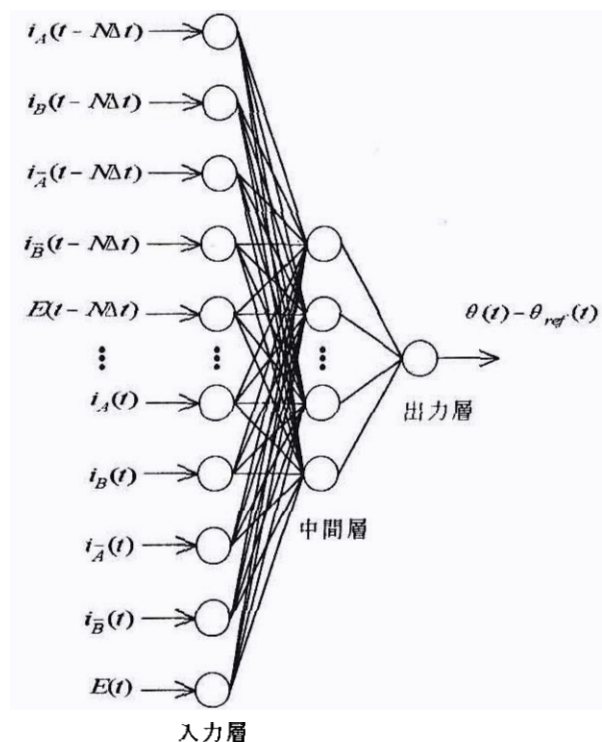


図3 ニューラルネットワークオブザーバの構造

本研究で用いているオブザーバは、リアルタイムで回転子角度を推定するものであるので、その出力は回転子角度の各時刻における瞬時値とする。また、オブザーバの入力は、各相に流れる励磁電流の値および駆動回路に対する励磁指令信号としている。ここで、励磁指令信号 E の値は、現在の相から次の相へ励磁指令信号が切り替わった瞬間の時刻において1、それ以外は0としている。

以上のようなデータを使用することにより、励磁電流値および励磁指令信号から回転子角度の値を推定するオブザーバを図2のように構成している。ニューラルネットワークには、サンプリング時間 Δt で取得された時刻 $(t - N\Delta t)$ から t の励磁電流値 i_A, i_B, i_C, i_D および励磁指令信号 E がそれぞれ $(N+1)$ 個ずつ、合計 $5(N+1)$ 個のデータが入力される。したがって、時刻0から $(N-1)\Delta t$ における回転子角度の値は推定できないことになる。ここで、 N の値は、ニューラルネットワークの学習において教師データと出力の誤差が十分小さな値に収束することを考慮し、 $N=15$ と決定した。

ニューラルネットワークは図2に示しているように、3層の階層構造形をしている。その詳細は、入力層のユニット数は $5(N+1)$ 個、出力層のユニット数は1個となっている。中間層のユニット数に関しては、回転子角度の値をリアルタイムで推定することを考慮し、この制限内においてできるだけ大きい値である9個としている。

次に、ニューラルネットワークの学習に用いた教師データについて述べる。学習において教師データとして用いられる時系列データは、実験システムにおいて実際にモータを駆動して回転子角度および各相の励磁電流の値を実測することにより作成される。実際に作成された回転子角度、励磁電流および励磁指令信号のデータは、駆動条件の違いに対するオブザーバの有効性を検討するために、テーブル上に取り付けられた負荷の重さが異なる case1 から case3

の3つの駆動条件下において進み角がそれぞれ 0.45deg , 0.90deg , 1.35deg で取得されている。

4. ニューラルネットワークオブザーバによる回転子角度の推定

以上により構築されたニューラルネットワークオブザーバを用いて、実際の駆動時における回転子角度の値をリアルタイムで推定し、その評価を行う。

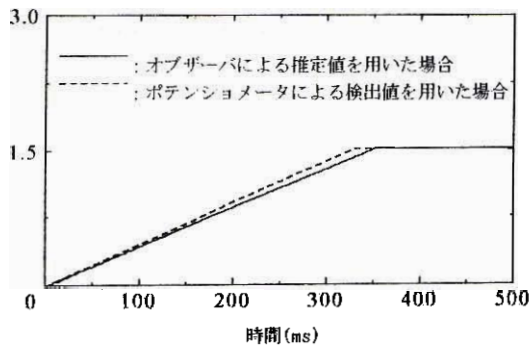
図4から図9に、得られたニューラルネットワークオブザーバを用いて回転子角度の値を推定した結果を示す。これらは、それぞれ40ステップさせたときの応答波形である。このときのテーブル移動量は $40 \times 0.0379 = 1.516\text{cm}$ である。

図4から図6は、教師データを取得したときと同一の駆動条件の場合である。これらより、オブザーバによる推定値を用いて進み角制御を行った実測値とポテンシオメータを用いた実測値の間に若干の差が見受けられるものの、停止位置のずれもなく良好に制御していることがわかる。教師データを取得した case2 と case3 の中間の駆動条件である図7においても推定値を用いた実測値がポテンシオメータを用いた実測値にほぼ一致している。また、教師データを取得時の条件下から大きく逸脱している図8においても、同様なことが言える。

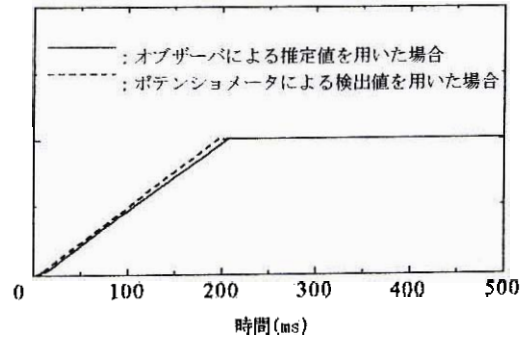
次に、開ループ制御で2相励磁を行った場合と、オブザーバによる推定値を用いて進み角制御を行った場合を比較している図9について、開ループ制御では脱調してしまう領域においても本手法を用いることにより安定した閉ループ駆動がなされていることがわかる。

5. おわりに

以上の結果から、オブザーバによる推定値を用いて実際に進み角制御を行った実測値とポテンシオメータによる実測値が様々な駆動条件においてほぼ一致していることより、本研究

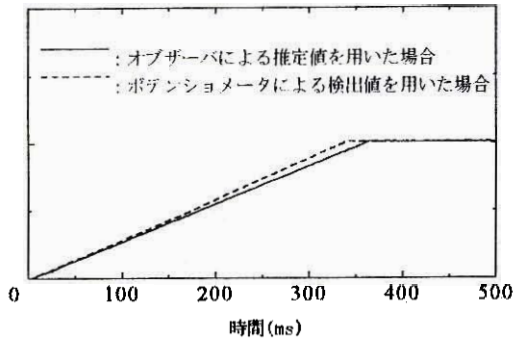


(a) 進み角 0.675deg (基本ステップの 3/8)

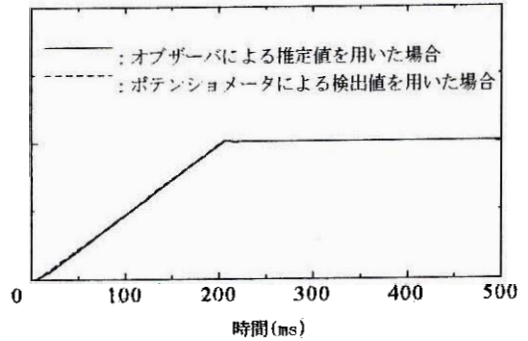


(b) 進み角 1.575deg (基本ステップの 7/8)

図4 オブザーバによる回転子角度の推定(駆動条件: case1)

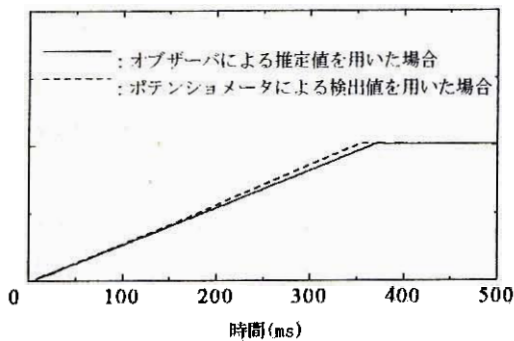


(a) 進み角 0.675deg (基本ステップの 3/8)

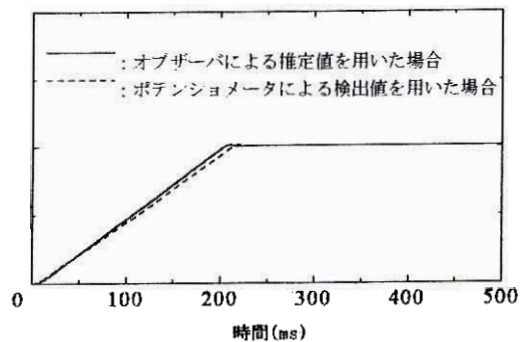


(b) 進み角 1.575deg (基本ステップの 7/8)

図5 オブザーバによる回転子角度の推定(駆動条件: case2)

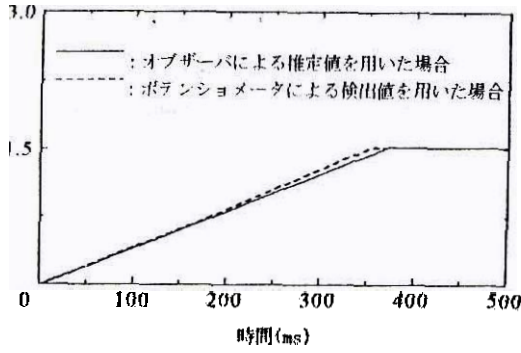


(a) 進み角 0.675deg (基本ステップの 3/8)

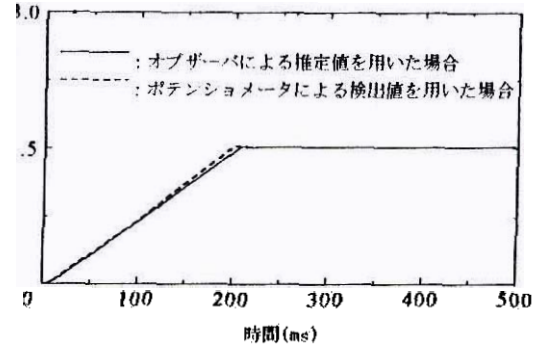


(b) 進み角 1.575deg (基本ステップの 7/8)

図6 オブザーバによる回転子角度の推定(駆動条件: case3)

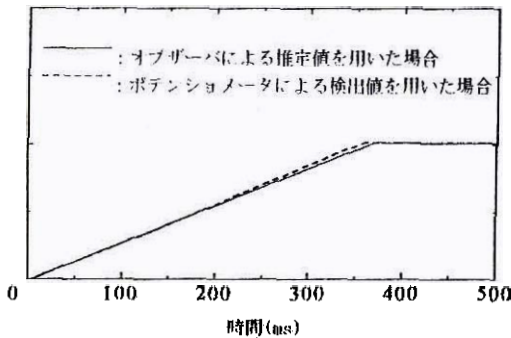


(a) 進み角 0.675deg (基本ステップの 3/8)

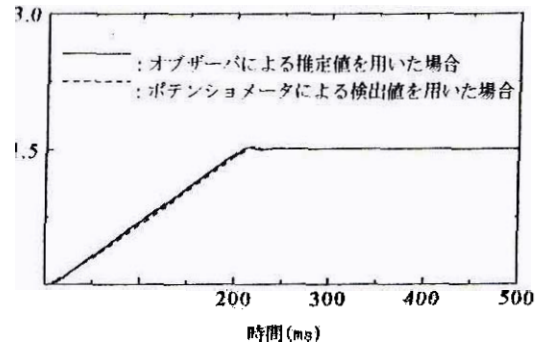


(b) 進み角 1.575deg (基本ステップの 7/8)

図7 オブザーバによる回転子角度の推定(駆動条件: case4)



(a) 進み角 0.675deg (基本ステップの 3/8)



(b) 進み角 1.575deg (基本ステップの 7/8)

図8 オブザーバによる回転子角度の推定(駆動条件: case5)

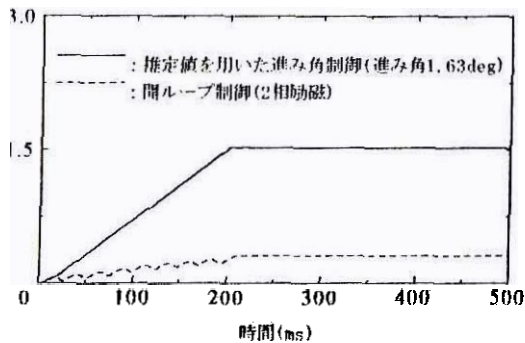


図9 オブザーバによる回転子角度の推定
(回転速度: 200pps)

で用いているオブザーバは、テーブル上の負荷の変更に対して有効であると言える。これにより、位置センサおよび速度センサを用いずに制御系の構築が可能であるというステッピングモータの利点を失わずに、開ループ制御系より

も広範囲な運用が可能である閉ループ制御系の構築がなされた。

<参考文献>

- 1) 見城尚志: 電子機器用精密小型モータ, 96/138, 総合電子出版社(1977)
- 2) 見城尚志, 菅原辰: ステッピングモータとマイコン制御, 263/290, 総合電子出版社(1994)
- 3) 海老原大樹, 岩佐孝夫: ステッピングモータ活用技術, 1/56, 工業調査会(1984)
- 4) 三浦武, 谷口敏幸: ニューラルネットワークによるステッピングモータのセンサレス角度検出, 電学論, 19-6, 776/781, (1997)
- 5) 馬場則夫, 小島史男, 小澤誠一: ニューラルネットの基礎と応用, 4/27, 共立出版(1994)