

ステッピングモータのセンサレス閉ループ位置制御 Position Control of a Stepping Motor using Sensorless Closed-Loop Control

○佐々木永*, 松尾健史*, 秋山宜万*, 三浦 武*, 谷口敏幸*

○Hisashi Sasaki*, Kenshi Matsuo*, Yoshikazu Akiyama*, Takeshi Miura*, Toshiyuki Taniguchi*

*秋田大学

*Akita University

キーワード: ステッピングモータ (stepping motor), ニューラルネットワーク (neural network),
センサレス化 (sensorless), 定常偏差の低減 (reduction of steady-state error)

連絡先: 〒010-0852 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

小形モータの一種であるステッピングモータは入力パルスに応じて一定角度ずつステップ状に回転するモータである。入力パルスの総数・周波数によって回転角度・回転速度を調整することができ、開ループにより位置制御・速度制御が可能なことから、低コストで簡易に制御システムを構築できる。また、デジタル的なパルス列の励磁指令によって駆動されるので、FA 機器、OA 機器などに幅広く使用されている¹⁾。

上記のように、ステッピングモータは基本的に開ループで制御されるが、開ループ系では目標値と制御量を比較する機構を持たな

いため、機械的摩擦によって生じた定常偏差を修正することができない。駆動トルクが十分大きいモータの駆動に関しては、機械的摩擦が位置決め制度に影響する可能性は低いですが、駆動トルクが小さい小形モータに関してはその可能性を無視できない。

この問題に対し、角度情報を扱った閉ループ系の構築が必要であり、近年、ニューラルネットワーク²⁾をオブザーバとして用い、角度検出をセンサレスに行う手法³⁾が提案されている。この手法を用いることで、ステッピングモータに対して高価な角度検出器を用いず、低コストに閉ループ系を構築することが可能となる。

そこで、本研究ではモータの巻線に印加さ

れた各相の相電圧および励磁指令信号と回転子の角度情報の関連性をニューラルネットワークに学習させ、オブザーバとして用い閉ループ系を構築した。そして、得られた角度情報を基に角度目標値を PI 制御器によって修正することで定常偏差の低減を図った。

2. 実験装置

本研究で使用したステッピングモータは、オリエンタルモーター社製の PK244-02B で、2相ハイブリット形、定格電圧 6[V]、定格電流 0.8[A]、基本ステップ角 1.8[deg.]のモデルである。このモータはバイファイラ巻線を持ち、ユニポーラ方式によって駆動される。

本研究で用いた実験装置を Fig.1 に示す。パーソナルコンピュータ (NEC PC9821Xa13)から、各相への励磁指令が D/A 変換ボードを介して電流制御形駆動回路へ出力される。この指令に従い各相に励磁電流が流され、モータが駆動される。モータの角度はロータリーエンコーダ (分解能 5000[pulses/rev.])によって検出され、Up/Down カウンタボードで 4 逓倍することによって、20000[pulses/rev.]の信号としてパーソナルコンピュータに入力される。また、モータの各相電圧は、モータ巻線に並列に挿入された抵抗の両端の電圧を測定することで得る。その際、低域通過フィルタを通して電圧波形に現れる高調波成分を取り除いた。得られた電圧値のデータは A/D 変換ボードを介してパーソナルコンピュータに入力される。なお、本

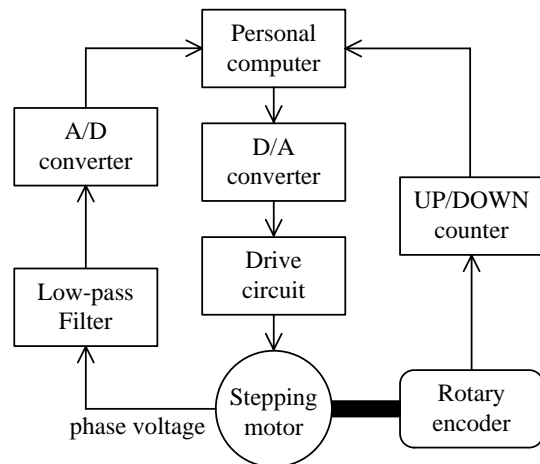


図1 実験システム

Fig.1 Experimental system.

実験システムにおける入出力データのサンプリング時間は 0.5[ms]である。

3. ニューラルネットワークオブザーバの構築

ステッピングモータ駆動時に各相の巻線に印加される電圧は、回転子の逆起電力や回転子と固定子の相対位置の変化によるインダクタンスの時間変化の影響を受ける。これらは回転子の角変位に誘起されるため、相電圧からの角度推定が可能となる。そこで、これらの関連性を非線形写像として扱うことができるニューラルネットワークに学習させることでオブザーバを構築する。これにより、制御対象や制御系全体のモデリングが不要となり、モデリングが困難な場合においても対応できる。

本研究で使用するニューラルネットワークオブザーバは、サンプリング時間毎に取得

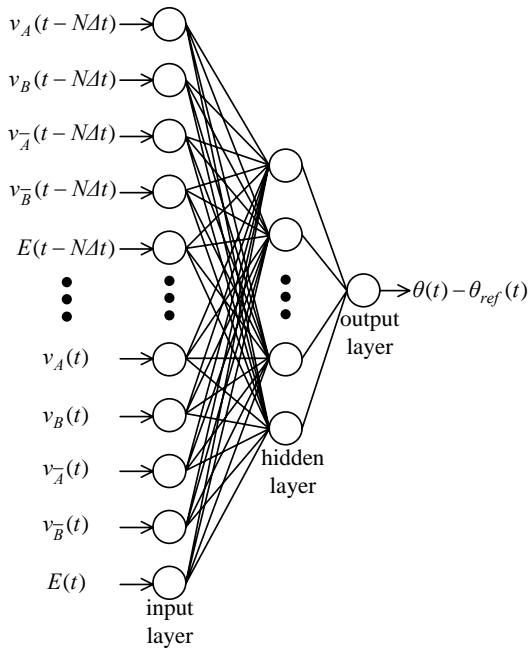


図2 ニューラルネットワークの構造

Fig.2 Structure of the neural network.

される相電圧および励磁指令信号から回転子の角度情報をリアルタイムで推定するものである。その構成は、Fig.2に示すような中間層を1層とした階層構造ニューラルネットワークであり、教師データと出力の関連性をback propagation法²⁾によって予め学習させたものになっている。

入力層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 における各相の相電圧 $v_A \sim v_B$ および励磁指令信号 E がそれぞれ $(N+1)$ 個ずつ入力される。従って、時刻0から $(N-1)\Delta t$ までは回転子の角度推定を行えないことになる。 N の値は学習時に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、 $N=11$ としている。よって、入

力層のユニット数は60個となる。また、中間層のユニット数はニューラルネットワークの演算量を極力減らすことと学習が安定に行われることを考慮し、8個とした。出力層は時刻 t における回転子の角度情報を扱えばよいので、1つとした。ただし、出力となる角度情報を累積値とすると回転子角度が有限の値に収まらなくなり、ニューラルネットワークの学習が困難になる。そこで、基本ステップ角ごとに見た目標停止位置 $\theta_{ref}(t)$ を基準とした相対位置 $\theta(t) - \theta_{ref}(t)$ を出力とする。ここで、 $\theta(t)$ は現在時刻 t における実際の回転子位置である⁴⁾。

4. ニューラルネットワークによる回転子角度の推定

前章で構築されたニューラルネットワークを用いて、回転子角度の推定を行った結果について検討する。

駆動法には基本ステップ角を細分化して駆動させるマイクロステップ駆動⁵⁾を使用した。また、角度目標値 θ_r は最終停止位置 θ_0 までランプ状に変化させ、静止させるものとする。教師データは、ランプ部分の回転速度 ω_{cs} を50[pps], 100[pps], 200[pps], 300[pps]とし、それぞれに対して無負荷と慣性負荷($10.0 \times 10^{-6} [\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2 / \text{rad}]$)装着した場合の計8つの駆動条件で取得した。ここで、pps値はフルステップ駆動に換算した場合のであり、以下においても同様とする。

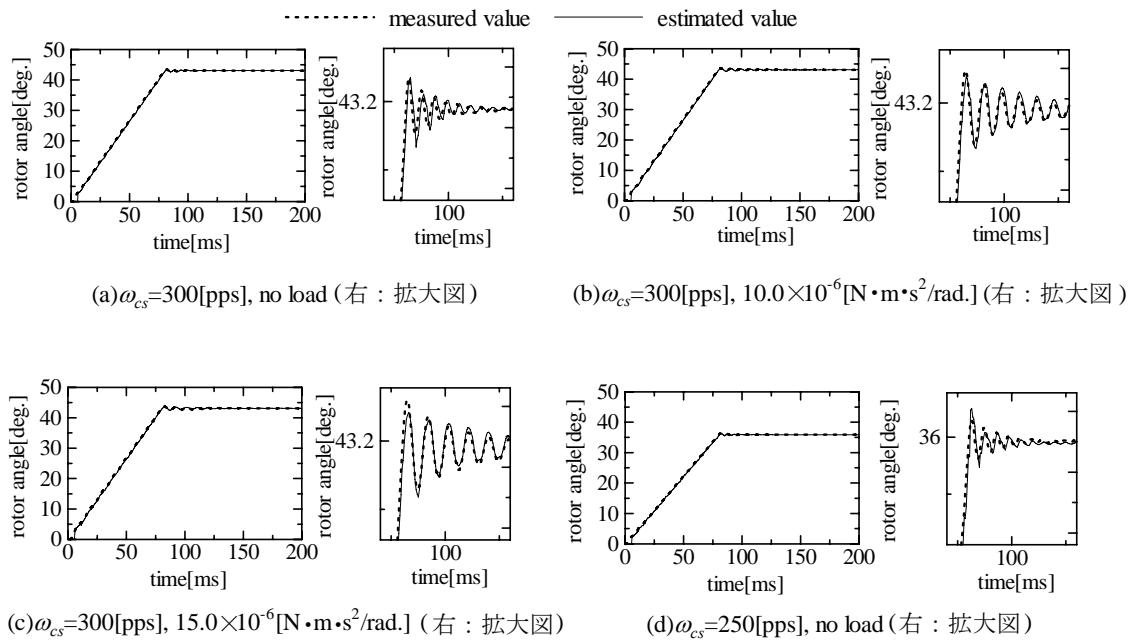


図3 推定結果

Fig.3 Result of estimation.

Fig.3 にニューラルネットワークを用いて回転子の角度情報を推定した結果の一例を示す。(a),(b)は教師データ取得時と同一の駆動条件,(c)は異なる負荷条件,(d)は異なる速度条件となっている。図より、ロータリーエンコーダを用いた実測値と推定値がほぼ一致しており、角度検出器の代用として有用だといえる。また、教師データと異なる駆動条件においても、ニューラルネットワークの汎化能力により、精度のよい推定ができていることが分かる。これより本研究で構築したニューラルネットワークが、負荷条件の変化に対してロバストであり、速度条件の変化にも対応できるといえる。

5. 制御システム

本研究では、ニューラルネットワークを用いて閉ループ系を構築し、定常偏差の低減を図っていく。制御システムは Fig.4 に示すような調整部に PI 制御器を有した形になっている。

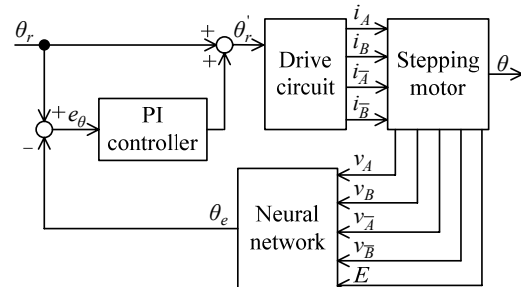


図4 制御システム

Fig.4 control system.

まず、ニューラルネットワーク用い、リアルタイムで角度推定値 θ_e をサンプリング時間毎に取得する。それを基に、角度目標値 θ_r を以下の式を用いて修正する。

$$\theta_r'(k+1) = \theta_r(k) + K_p e_\theta(k) + K_i \Delta t \sum_{j=1}^k e(j) dt \quad (1)$$

ここで、 θ_r' : 修正された角度目標値、 e_θ : 偏差、 K_p : 比例ゲイン、 K_i : 積分ゲイン、 Δt : サンプリング時間、 k : データ取得時のサンプリング回数⁶⁾。

6. 実験結果

前章に示した制御システムを用いて実験を行った結果を以下に示す。

本実験では、前章で示した目標角度波形に関して ω_{cs} を50[pps]、100[pps]、150[pps]、200[pps]、250[pps]及び300[pps]とした場合について実験を行った。最終停止位置 θ_0 は、上記の条件それぞれの場合に対して7.2[deg.]、14.4[deg.]、21.6[deg.]、28.8[deg.]、36.0[deg.]及び43.2[deg.]としている。また、駆動法は前章で示したマイクロステップ駆動を用いている。

PI制御器のゲインは実験の結果、比例ゲインを固定し、角度目標値 θ_r の変化に対して積分ゲインのみ調整することとした。このとき比例ゲイン $K_p=0.08$ とし、積分ゲイン K_i を $\omega_{cs}=50\sim 300$ [pps]の変化に応じて試行錯誤的にゲイン調整し、その結果をTable1に示す。Table1のデータに基づいて、横軸に回転速度

ω_{cs} 、縦軸に積分ゲイン K_i をプロットしたものをFig.5に示す。

表1 実験条件

Table.1 Experimental condition

	ω_{cs} [pps]	θ_0 [deg.]	K_i
case1	50	7.2	4.51
case2	100	14.4	2.73
case3	200	28.8	1.81
case4	300	43.2	0.95

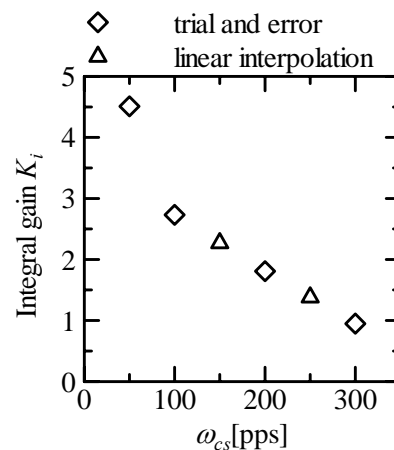
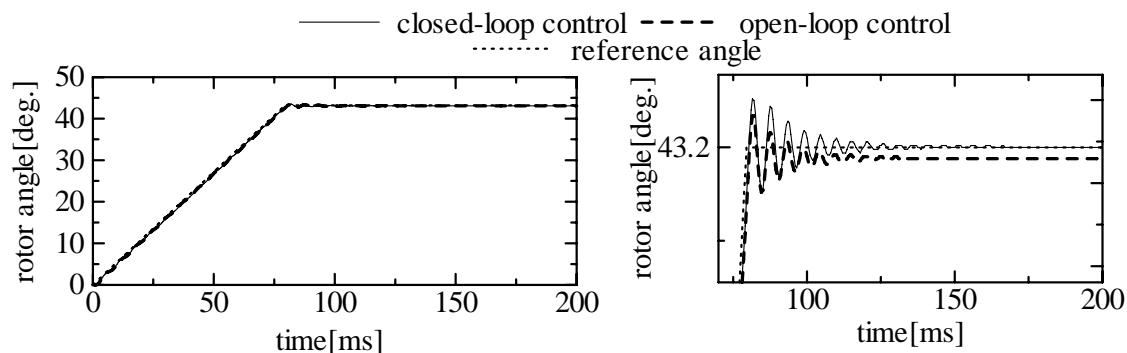


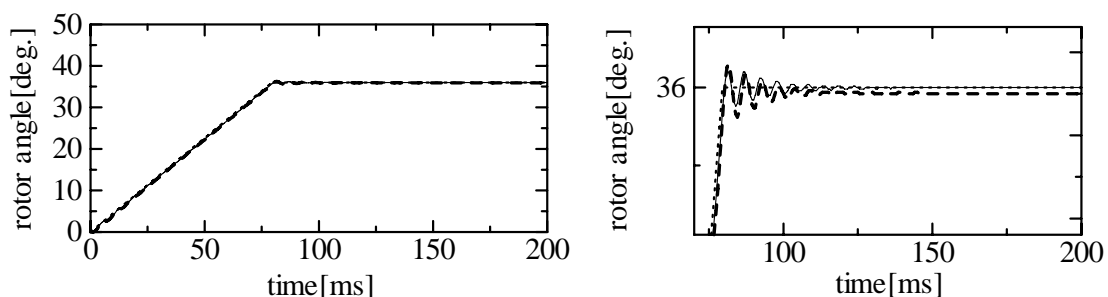
図5 積分ゲインの変化

Fig.5 Variation of integral gain.

ゲイン調整を行っていない回転速度 ω_{cs} の積分ゲインはTable1のデータ点を用い、隣接する2点を直線で結ぶことでその値を得ている。ここで、Fig.5中の Δ が線形補間によって得られた積分ゲインである。Fig.6には、ゲイン調整を行った $\omega_{cs}=300$ [pps]の場合のデータ例および、線形補間によって得た積分ゲイン



(a) $\omega_{cs}=300[\text{pps}]$, no load (右：拡大図)



(b) $\omega_{cs}=250[\text{pps}]$, no load (右：拡大図)

図6 回転子の時間変化

Fig.6 Temporal variation of rotor angle.

$\omega_{cs}=250[\text{pps}]$ の場合のデータ例を示す。

Fig.6(a), (b)より開ループで駆動するより本手法の方が定常偏差を低減させているのが分かる。また、 $\omega_{cs}=250[\text{pps}]$ の場合、線形補間によって得られた積分ゲインの値を用いても開ループに比べて定常偏差が低減しているのが分かる。しかし、(a), (b)ともに最終停止位置付近で生じる振動を抑制させることはできず、振動抑制の効果はあまり見られなかった。

7. 制御特性の評価

目標角度波形に対して、本システムの制御特性を定量的に評価するために、評価指標として以下の2つを用いた。

まず、第一の評価指標として、最終停止位置における定常偏差 $e(\infty)$ を用いる。本研究では観測時間を t_{\max} として、最終観測時間における目標値からの偏差を $e(\infty)$ と定義している。 $e(\infty)$ の値によって目標値に対する位置決め精度を評価できる。実際の計算においては $t_{\max}=200[\text{ms}]$ とした。

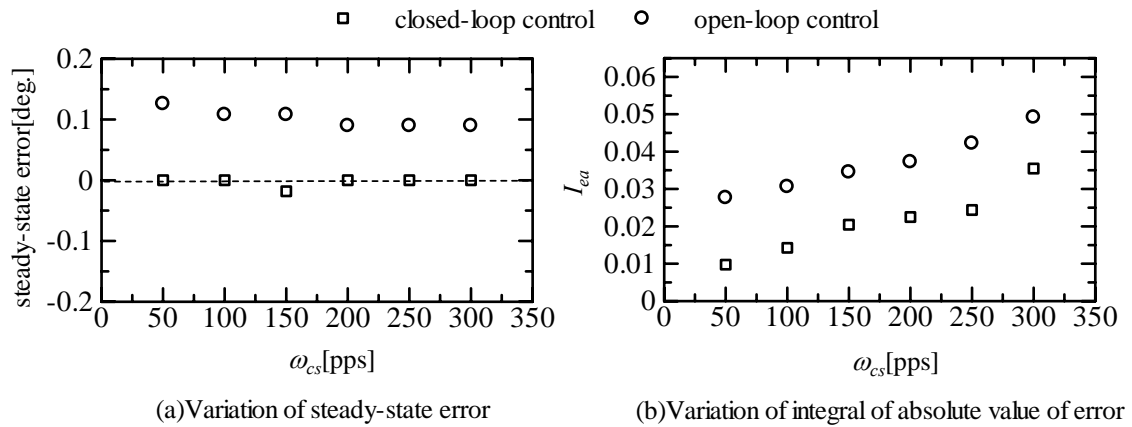


図7 評価指標の変化

Fig.7 Variation of performance index.

第二の評価指標として、次式で定義される目標値と実際の回転子角度の偏差の絶対値を時間積分すること(誤差面積)によって得られる評価関数 I_{ea} を用いた。

$$I_{ea} = \int_0^{t_{\max}} |\theta(t) - \theta_r(t)| dt \quad (2)$$

この値から、目標値が時間的に変化している期間から最終停止位置付近に至るまでの観測時間全体における目標値追従性が評価できる。

$\omega_{cs} = 50 \sim 300$ [pps]における定常偏差と誤差面積を Fig.7 に示す。(a)において、開ループ制御では、約 0.1 [deg.]定常偏差が生じているが、本手法では定常偏差がほとんど生じておらず、位置決め精度が向上しているのが分かる。(b)において、開ループ制御に比べ本手法を用いたほうが、誤差面積が小さくなっており、目標値追従性にも効果的であるのが分かる。

8. おわりに

本研究では角度検出器の代用としてニューラルネットワークを用いることで低コストに閉ループ系を構築し、機械的摩擦によって生じる定常偏差の低減を行った。その結果、調整部に PI 制御器を用いて、角度目標値を修正することで定常偏差の低減が可能であることを実験によって実証した。しかしながら、最終停止位置付近での振動抑制には効果的でないことが示された。また、角度目標値を変えるたびに手動でゲイン調整を行わなければならない、制御期間中はゲインの値を固定していた。

今後は、上記のことを踏まえ、ゲインスケジューリング法によって制御期間中に PI 制御器のゲインを調整するシステムを構築し、制御特性の改善および、慣性負荷を装着した場合についても検討していく予定である。

参考文献

- 1) 見城 尚志：小形モータの基礎とマイコン制御，96/138，総合電子出版社(1983)
- 2) 馬場 則夫，小島 史男，小澤 誠一：ニューラルネットワークの基礎と応用，1/27，共立出版(1994)
- 3) 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 D，**117-6**，776/781(1997)
- 4) 三浦 武，秋山 宜万，谷口 敏幸：ステッピングモータ用ニューラルネットワーク形オブザーバ，電気学会全国大会，**4-145**，1432(2001)
- 5) 百目鬼 英雄：ステッピングモータの使い方，95/108，工業調査会(1993)
- 6) 須田 信英：PID 制御，1/16，朝倉書店(1992)