

回転子慣性の変動に対応したブラシレス DC モータの位置制御 Position Control of a Brushless DC Motor Considering Variation of Rotor Inertia

太田裕幸*, 松尾健史*, 三浦 武*, 谷口敏幸*, 米田 真**

Hiroyuki Ota*, Kenshi Matsuo*, Takeshi Miura*, Toshiyuki Taniguchi*, Makoto Yoneda**

*秋田大学, **オリエンタルモーター

*Akita University, **Oriental Motor Co., Ltd.

キーワード：ブラシレス DC モータ (brushless DC motor), 位置制御 (position control),
慣性負荷 (inertial load), 目標値追従性 (reference tracking), PID 要素 (PID element)

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

ブラシレス DC モータはブラシ付き DC モータのような機械的整流機構を有していないため、保守が容易であることから家電機器から OA 機器まで幅広く用いられている¹⁾。さらに、マイクロプロセッサの高速化に伴い、ベクトル制御アルゴリズムによる高性能な可変速制御が可能となっており、特に、位置決め制御においては、高精度化と高速化といった厳しい制御仕様を満たす制御システムの開発が求められている^{2),3),4)}。また、駆動条件が異なる用途に同一のモータシステムを利用するといった状況も出始めており、汎用性の高いモータシステムが必要とされている。

位置決め方法として、文献 5) では位置指令を S 字状に与えて目標位置付近でモ-

ドを切替える手法が提案されており、良好な位置決め制御特性が得られる。しかし、モータにかかる負荷が変動する場合にはパラメータの調整が必要である。この点を考慮し、文献 2) では未知の摩擦負荷を推定し、目標位置だけを与えることで位置決めを可能すると手法が提案されている。上記の手法では速度制御の制御器として PI 制御が用いられており、更なるロバスト性の向上には制御器に関する検討も必要であると考えられる。そこで、本研究では変動する駆動条件に対する制御系の調整を簡易に行う方法を検討する。ここでは、上記の変動する駆動条件の中でも、特に負荷の慣性モーメントが変化する状況に着目する。この場合、回転部分における振動が共振や騒音の原因となると考えられる。また、負荷変動によって位置指令に対する応答が遅れて

しまうという問題が生じる．そのため，素早い整定を必要とする位置制御システムにおいては慣性モーメントの変動に対応した制御が必要となる．

本研究では，位置決めする場合に用いられている台形速度プロファイル^{4),6)}を時間積分して得られた角度波形を目標値とし，簡易な方法を用いて目標値追従性の改善や慣性負荷の変動による振動の抑制を行った．その結果，低速領域から定格速度付近に至るまで目標値追従性の改善が見られた．

2. 実験装置

本システムにおいて使用したブラシレス DC モータは，オリエンタルモーター社製 DXMS2020-AA で，定格回転速度 $3000[\text{min}^{-1}]$ ，定格電流 $2.7[\text{A}]$ である．また，内部に制御機構を含む駆動システムはオリエンタルモーター社製のサーボアンプ DXDV020-A であり，正弦波 PWM 電流制御（全デジタル），キャリア周波数 $10[\text{kHz}]$ である．

上記のモータを用いた実験システムの構成を Fig.1 に示す．パーソナルコンピュータ PC 1 からのパルス列指令は A/D・D/A 変換器の平行ポート部を介して駆動システムに入力される．駆動システム内でこの指令値に従った励磁電流を各相に流し，モータを駆動させる．モータの回転子角度はロータリエンコーダによって検出された 2 相信号を駆動システム内の分周出力回路を通じて駆動システムの外部に出力される．この信号をアップダウンカウンタにおいて 4 逓倍することにより， $9600[\text{pulses/rev.}]$ の精度で検出され，PC 1 へ入力される．

PC 2 は駆動システムのパラメータの読み

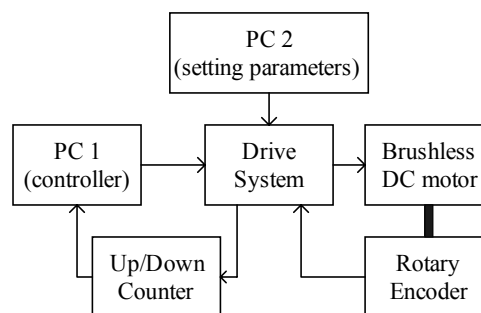


図1 実験システム
Fig.1 Experimental system.

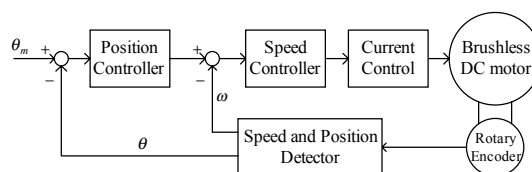


図2 駆動システムの制御ブロック図
Fig.2 Control diagram of drive system.

出しおよび書き込みを行うためのパーソナルコンピュータである．また，本システムにおける入出力データのサンプリング時間は $0.2[\text{ms}]$ である．

本研究で使用した駆動システムの制御機能として，速度制御，位置制御，トルク制御がある．その中でも，本研究ではパルス列指令による位置制御の機能を使用し，指令パルス $1[\text{pulse}]$ に対するモータの回転量を $3.6[\text{deg.}]$ と設定した．

駆動システム内で行われている制御系の構成を Fig.2 に示す．位置制御器に P 要素，速度制御器に PI 要素を備えている．位置制御器の比例ゲインと速度制御器の積分時間は PC2 を用いて書き換えが可能なパラメータである．また，この駆動システムにはオートチューニングの機能があり，チューニング方式としてマニュアル(以降, manual)，オート(低剛性)，オート(高剛性)の三つがある．本研究では manual のみを使用し，上記の制御パラメータをデフォルトの値と

して使用した。

3. 制御システム

フィードバック制御は制御量を検知しながら修正動作を行うため、直接測定できない外乱といったシステムの状態を乱す動作に対しても修正動作を行うことができるが、目標値の変化といった前もってシステムに与える影響が予測できる動作に対しても、その影響が偏差となって現れてから遅れて修正動作を行う⁷⁾。予測できる動作に対しては必要な操作量を求めることができ、その分を考慮して入力に加えることによって、速応性の改善ができるフィードフォワード制御がある⁷⁾。

本研究では Fig.3 に示すようなフィードバック制御と目標値からのフィードフォワードを組み合わせた制御システムを構成し、目標値追従性の改善を行った⁸⁾。図中の補償要素 1 には比例要素のみとし、比例ゲインを 1 とする。また、補償要素 2 には PID 要素を用いた。従って、サンプリング時間毎に取得された回転子角度 θ の k 番目のデータを基に以下の式を用いて $k+1$ 番目の操作量 θ_m の更新を行う。

$$\theta_m(k+1) = \theta_r(k) + K_p e_\theta(k) + K_i \Delta t \sum_{k=1,2,3 \dots} e_\theta(k) + K_D \frac{e_\theta(k) - e_\theta(k-1)}{\Delta t} \quad (1)$$

ただし、 θ_r : 目標値、 e_θ : 偏差、 K_p : 比例ゲイン、 K_i : 積分ゲイン、 K_D : 微分ゲイン、 Δt : サンプリング時間である。

4. 目標値の設定

本システムに与える回転子角度の目標値

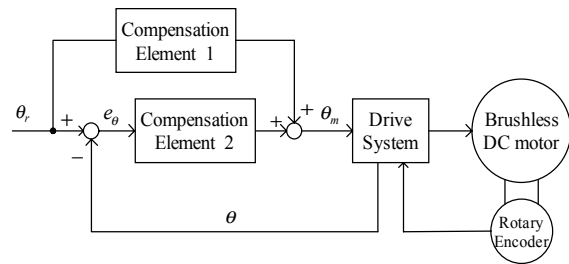


図3 制御システム
Fig.3 Control system.

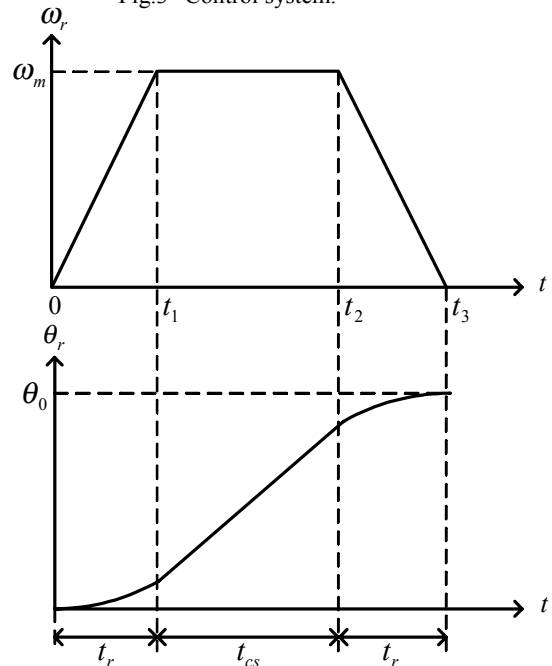


図4 角度目標値の時間変化プロファイル
Fig.4 Profile of the temporal variation of the reference angle.

の時間変化は Fig.4 に示すように回転速度 ω_r のプロファイルを台形として与え、それを時間積分した波形を用いる⁶⁾。

図中の 0 から t_1 および t_2 から t_3 までの間はそれぞれ加速、減速の期間であり、 t_1 から t_2 の期間は一定の速度 ω_m で回転する。また、 θ_0 は最終停止位置である。ここで、Fig.4 に示すように加速期間と減速期間は同じとする。

5. 実験結果

ここでは、Fig.4 のプロファイルにおいて

$\omega_m = 600[\text{min}^{-1}]$, $1200[\text{min}^{-1}]$, $1800[\text{min}^{-1}]$, および $2400[\text{min}^{-1}]$ とした場合について実験を行った．最終停止位置は上記のそれぞれの場合に対して $\theta_0 = 432[\text{deg.}]$, $864[\text{deg.}]$, $1296[\text{deg.}]$ および $1728[\text{deg.}]$ としている．予備実験として低速から定格速度付近に至るまでの間で $\omega_p = 200[\text{pps}]$ 毎に変化させているため，上記のような最終停止位置としている．加速期間と減速期間は $40[\text{ms}] \sim 50[\text{ms}]$ の間で実験ごとに変化させている．一定速度で回転する期間 t_{cs} は，回転速度 ω_m が同一の場合には最終停止位置が同じ値になるように加速期間と減速期間の変化に応じて調整している．

駆動システムのチューニング方式は前述のように manual とし，負荷の慣性モーメントの変動に対するロバスト性を評価するため，慣性負荷(慣性モーメント： $685 \times 10^{-7}[\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2/\text{rad}]$ ，回転子慣性の約 5 倍)を取り付けた場合の実験と Fig.2 の制御システムを用いた場合に関する実験を行っている．

予備実験では $t_r = 40[\text{ms}]$ とし，調整に要する時間を短くすることを考慮した．そのため，回転速度 ω_m に応じて調節するパラメータを 1 つにしなければならない．予備実験の結果，比例ゲインや微分ゲインは固定し，積分ゲインのみ調節することとした．このとき，比例ゲイン $K_p = 1.5$ と微分ゲイン $K_D = 0.0075$ とし，積分ゲイン K_i を $\omega_m = 240[\text{min}^{-1}] \sim 2400[\text{min}^{-1}]$ の変化に応じてゲイン調整した結果を Table 1 に示す．Table 1 のデータに基づいて，横軸に回転速度 ω_m ，縦軸に積分ゲイン K_i としてプロットしたものを Fig.5 に示す．

ゲイン調整を行っていない回転速度 ω_m の積分ゲインは表 1 のデータ点を用い，隣

表 1 実験条件

Table 1 Experimental condition.

	$\omega_m[\text{min}^{-1}]$	$\omega_p[\text{pps}]$	$\theta_0[\text{deg.}]$	K_i
case 1	240	400	172.8	0.44
case 2	480	800	345.6	0.50
case 3	720	1200	432	0.58
case 4	960	1600	691.2	0.63
case 5	1200	2000	950.4	0.83
case 6	1440	2400	1123.2	1.50
case 7	1680	2800	1296	2.14
case 8	1920	3200	1382.4	5.36
case 9	2160	3600	1555.2	6.25
case 10	2400	4000	1728	8.33

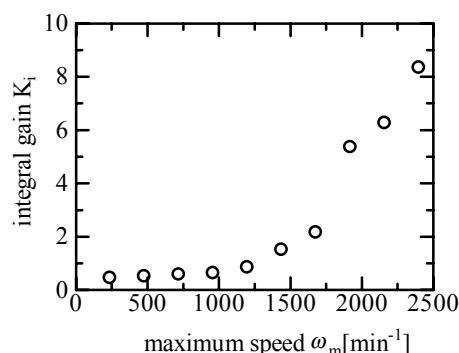


図5 積分ゲインの変化

Fig.5 Variation of integral gain.

接する 2 点を直線で結ぶことによって値を得ている．線形補間を行って得た積分ゲインを用いたデータの例として， $t_r = 40[\text{ms}]$ ， $\omega_m = 600 [\text{min}^{-1}]$ とゲイン調整を行った場合のデータの例として $t_r = 40[\text{ms}]$ ， $\omega_m = 2400 [\text{min}^{-1}]$ の実験結果を Fig.6 に示す．

(a)，(c)のように補償要素がない場合に比べて本手法のほうが目標値へ追従していることがわかる．また， $\omega_m = 600 [\text{min}^{-1}]$ 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補償要素がない場合に比べて目標値へ追従していることがわかる．慣性負荷を取りつけた(b)，(d)を見ると，同様に目標値への追従性の改善が見られること

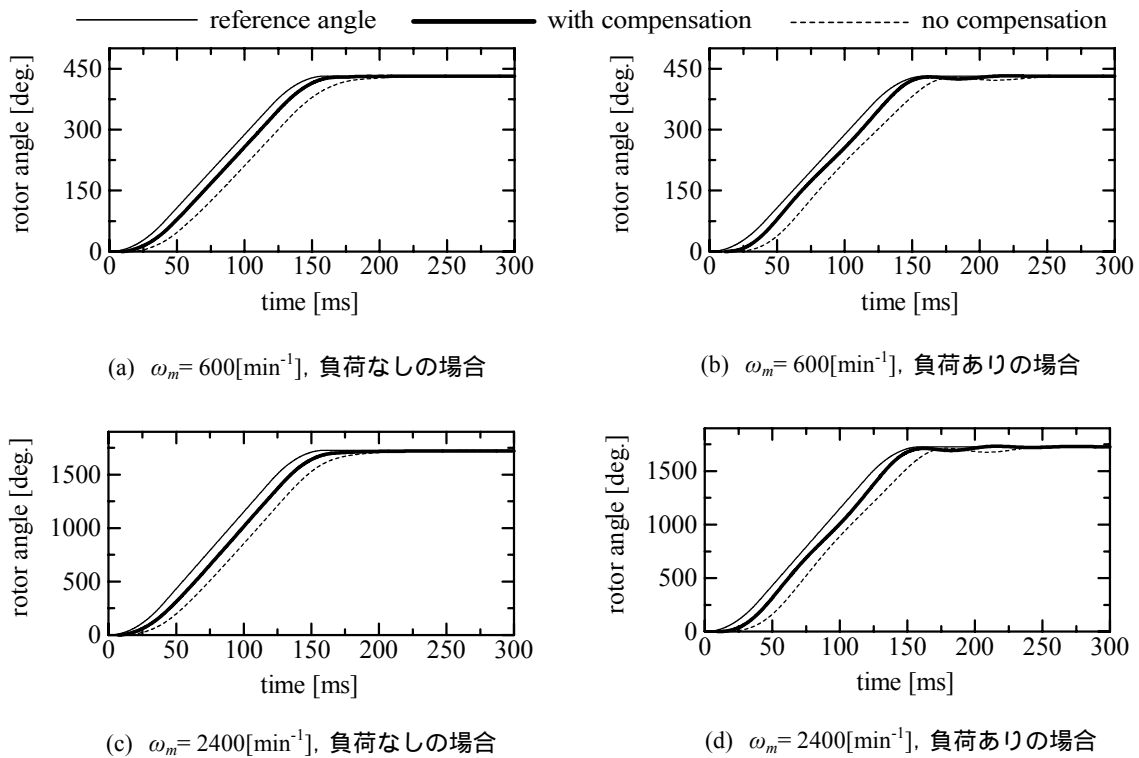


図6 回転子角度の時間変化
Fig.6 Temporal variation of rotor angle.

がわかる．補償要素がない場合を見ると慣性負荷の変動によって振動を生じていることがわかり，本手法を用いてもその振動を完全に抑制することができず，振動抑制の効果があまり見られなかった．これは回転子の振動が修正された目標角度波形に影響を与えているために抑制できなかったと考えられる．

6. 制御特性の評価

Fig.4 に示した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．ここでは，その評価指標として以下の2つを用いた⁶⁾．

1) 整定時間 t_s

本研究では目標値が最終停止位置に到達

する時間 t_3 から，実際の回転子角度が最終停止位置の $\pm 0.1 \times 3.6$ [deg.] 以内に収まるまでに要した時間を整定時間 t_s とした⁶⁾．この値により，本システムがどのくらい速やかに目標値に到達しているかを定量的に評価できる．

2) 面積誤差 I_{pi}

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により得られる評価関数 I_{pi} を用いた⁶⁾．

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

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に至るまでの制御期間全体における目標値追従性を定量的に評価できる．ここで， $t_{\max} = 720$ [ms] とした．データの例として $\omega_m = 600$ [min⁻¹] と

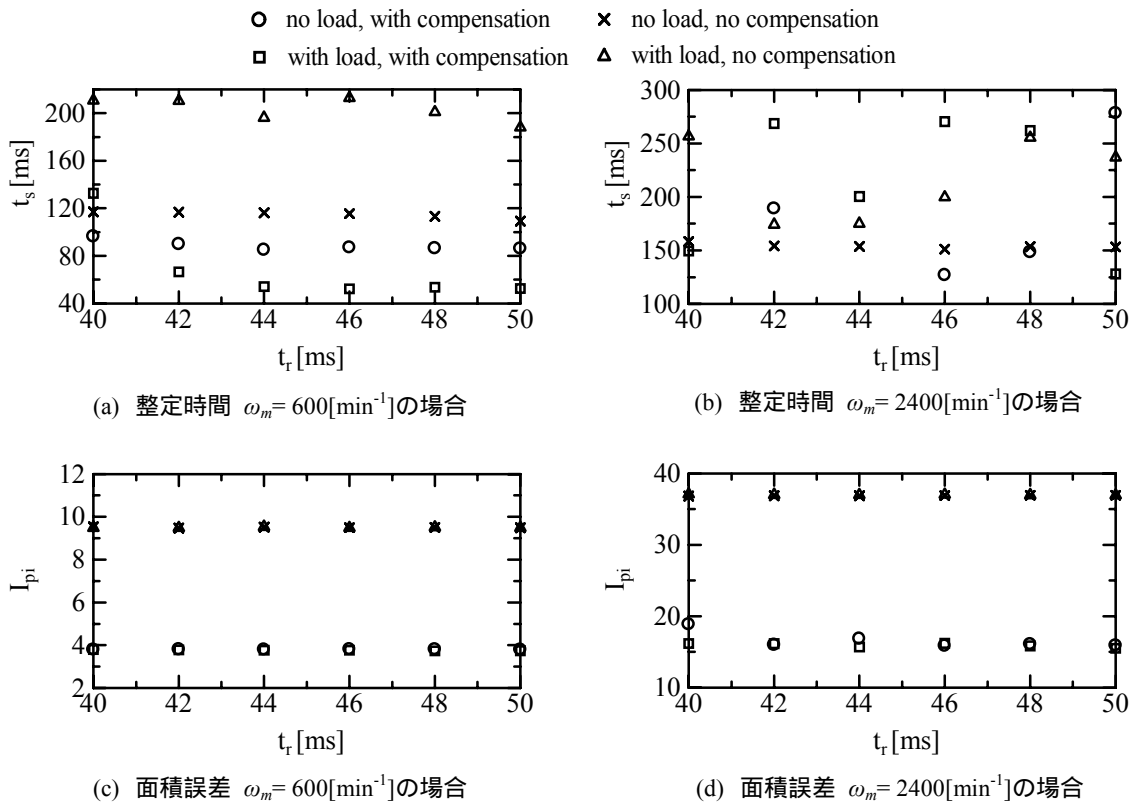


図7 整定時間と評価関数の変化
 Fig.7 Variation of settling time and performance index.

2400[min^{-1}], $t_r = 40 \sim 50[\text{ms}]$ まで変化させたときの整定時間と面積誤差を Fig.7 に示す.

(a)においては、補償要素なしの場合よりも本手法を用いた方が整定時間を短くなっていることがわかる。加減速期間の変化に対して、パラメータの再調整をしなくてもほとんど制御特性が変わらないこともわかる。しかし、(b)のように回転速度が速くなった場合には、補償要素がない場合に比べて、整定時間が長くなっていることがわかる。これは回転子角度のオーバーシュートを抑えるために積分ゲインの値を小さくしたため、最終停止位置に達する前に停止したことが考えられる。

(c), (d)のいずれにおいても補償要素ありの場合には負荷の状態が変動しても面積誤

差の値はほとんど変化せず目標値追従性の改善が見られる。また、回転速度 ω_m が同一の場合には加減速期間の値が変化してもほぼ同じ値になっていることがわかる。これは、補償要素を用いることで加減速期間の変化に対して目標値の修正が適切に行われていると言える。

7. おわりに

本研究では慣性負荷の変動に対する目標値への追従性の改善に関する検討を行った。その結果、簡易な方法により、駆動システム内で行われている制御パラメータの変更なしにパルス列指令の調整のみで改善すること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，慣性負荷の変動に対して回転子が振動してしまうということが示された．また，ゲイン調整を手動で行わなければならない，オンラインで制御ゲインを調整するような制御器に関する検討が必要であると考えられる．

今後は，上記のことを含め，他の制御機能を用いてシステムを構成し，同様の検討を行う予定である．

参考文献

- 1) 萩野弘司：ブラシレス DC モータの使い方，1/4，オーム社（2003）
- 2) 間下知紀，大石 潔，百目鬼英雄：摩擦負荷トルクを考慮したサーボモータの高速位置決め制御系の一構成法，電学論 D，124，7，666/673（2004）
- 3) 三浦 武，松尾健史，谷口敏幸：小形モータ制御方式の動向，電気学会回転機研究会，RM-04-164，21/25（2004）
- 4) 大塚二郎：位置決め制御技術の現状と動向，計測と制御，41，11，769/774（2002）
- 5) 酒井剛志，岩崎 誠，松井信行：モード切替え制御による高速・高精度位置決め制御システム，電学論 D，118，7/8，870/875（1998）
- 6) 三浦 武，谷口敏幸，百目鬼英雄：前置補償要素の適用によるステッピングモータのマイクロステップ駆動時の回転子振動の抑制，電学論 D，120，12，1462/1470（2000）
- 7) 須田信英，他：PID 制御，56/62，朝倉書店（1992）
- 8) 同，69/74