

ステッピングモータの前置補償要素を用いた
位置決め制御時の過渡応答に関する検討

Transient Response in Positioning a Stepping Motor Using a Pre-compensator

○河越 諒*, 松尾 健史*, 田島 克文*

○Ryo Kawagoe*, Kenshi Matsuo*, Katsubumi Tajima*

*秋田大学

*Akita University

キーワード : ステッピングモータ (stepping motor), 共振周波数 (resonance frequency),
回転子振動 (rotor vibration), 前置補償要素 (Pre-compensator)

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

ステッピングモータは、駆動回路に指令パルスを入力することで回転角度および、速度を開ループで制御可能なモータである。このため、センサを使用しない開ループ制御が可能であるため、システムを安価で簡易に構成可能である^{1,2)}。

しかし、位置決め時に回転子振動が発生する問題がある。この振動を低減する手法として、固有周波数成分を除去する低域通過フィルタ形の前置補償要素の利用が提案されている³⁾。しかし、この手法は位相遅れによる追従誤差が生じる。この追従誤差を除去するため、ゼロ位相フィルタ、およ

び、低域通過フィルタで構成される前置補償要素を用いる手法⁴⁾あるいは、1次進み要素で構成されるランプ追従フィルタ⁵⁾、および、低域通過フィルタで構成される前置補償要素を用いる手法⁶⁾が提案されているが、このうち文献6)の手法では位置決め時に行き過ぎ量が発生するという問題がある。

本研究では先行研究をもとに停止角度付近でランプ追従フィルタの1次進み要素のパラメータを調整する手法の提案をし、その性能を検討する。具体的には、追従誤差を生じずに停止時の過渡応答の改善をする制御法の構築をする。

2. 制御システム

2.1 実験システム

本研究で用いた実験システムを Fig. 1 に示す. 使用したステッピングモータは 2 相ハイブリッド形のオリエンタルモーター社 PK244-02B である. そのモータの仕様を Table 1 に示す. また, 駆動方式はマイクロステップ駆動となる.

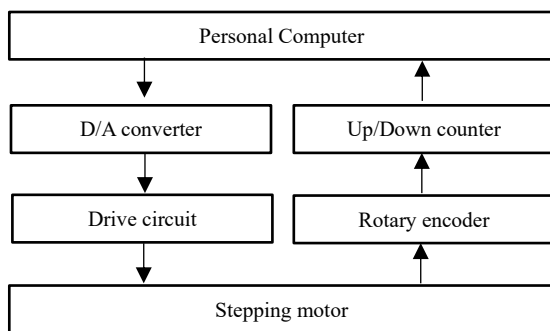


Fig. 1 Experimental system.

Table 1 Specification of the stepping motor.

Holding torque	0.26 [N·m]
Roter inertia	5.4×10^{-6} [N·m·s ² /rad]
Rated current	0.8 [A/phase]
Rated voltage	6.0 [V]
Winding resistance	7.2 [Ω /phase]
Winding method	bifilar winding
Fundamental step angle	1.8 [deg.]

実験システムの流れとして, モータの各相への励磁指令はパーソナルコンピュータ(PC)から, Digital-Analog(D/A)変換器を介してデジタル信号からアナログ信号へと変換され駆動回路へと送られる. 駆動回路は, この入力された指令値に従って制御された電流値をモータの各相へ励磁電流として流し, それに従ってモータが駆動される. 駆動して回転した角度はロータリエンコーダ

により取得され, Up/Down(U/D)カウンタを介して, デジタル信号へと変換されたのち PC へ測定データが出力される.

2.2 制御方法

前置補償要素を用いたステッピングモータのマイクロステップの制御系は Fig.2 となる.

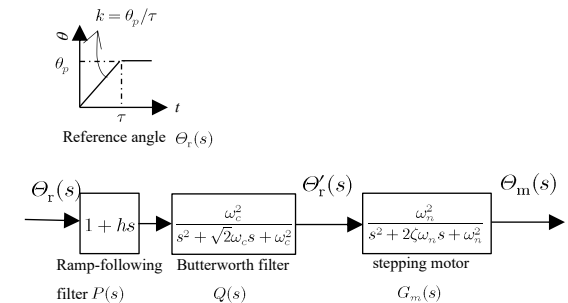


Fig. 2 Control system of a stepping motor.

この制御系において, 目標角度 $\theta_r(s)$ を Fig.2 に示すようなランプ入力としている. ここで θ_p は回転子が時間 τ で停止する目標停止角度であり, それらを用いて速度 k が導出される. 与えられた $\theta_r(s)$ を入力として, 提案された前置補償要素であるランプ追従フィルタ $P(s)$, および, バターワースフィルタ(BF) $Q(s)$ を介した $\theta_r'(s)$ が出力される. これに従ってステッピングモータ $G_m(s)$ の出力 $\theta_m(s)$ がなされる. 使用した前置補償要素について, 追従誤差を取り除くためのランプ追従フィルタ $P(s) = 1 + hs$ ⁵⁾と固有周波数成分を取り除くバターワースフィルタ $Q(s) = \omega_c^2 / (s^2 + \sqrt{2}\omega_c s + \omega_c^2)$ で構成されており, h は追従誤差を除去するために設定された定数, ω_c は遮断周波数となっている. また, ステッピングモータは 2 次遅れ系³⁾で示され $G_m(s) = \omega_n^2 / (s^2 + 2\zeta\omega_n s +$

ω_n^2)³⁾となる。このとき、 ζ は減衰比、 ω_n は固有周波数となっている。

また、このシステムの追従誤差 $E(s)$ は次のように表される⁶⁾。

$$E s = \lim_{s \rightarrow 0} s \{ \Theta_r(s) - \Theta_m(s) \}$$

ランプ入力 $\Theta_r s = k/s^2$ の場合、 $E s = 0$ 、すなわち誤差をなくすためには、 $h = 2\zeta/\omega_n + \sqrt{2}/\omega_c$ の条件が必要となる。ここで、本研究で使用するモータは、文献 6)と同様であるため、各パラメータに関しても同様に以下として設定する。 $\zeta = 0.0749$ 、 $\omega_n = 773 \text{ rad/s}$ 、 $\omega_c = 241 \text{ rad/s}$ 。 h はこれらのパラメータをもとに決定される。

本研究の駆動法として、追従誤差なく停止時に行き過ぎ量の低減を実現するため、駆動から停止までは $h = 2\zeta/\omega_n + \sqrt{2}/\omega_c$ とし、目標停止角度付近となったら $h = 0$ とする方法をとる。このような方法で駆動制御を行う。

3. 実験

本章では、行き過ぎ量の低減を確かめるために、目標停止角度の手前でランプ追従フィルタのパラメータである h を0とし過渡応答の出力をさせる実験を行う。

3.1 実験方法

最初の実験として、パルス周波数を 100, 500, 1000 pps と変化させ、マイクロステップ駆動によりステップ応答を求める。ここで使用しているパルス周波数 [pps]とは基本ステップ角と角速度の積で表される。今回は基本ステップ角が 1.8 deg であることから

$1.8 \times 100 = 180 \text{ pps}$ となる。また、余計な行き過ぎ量が発生しないように目標停止角度より手前の角度で定数 $h = 0$ とする。ここで、各パルス周波数ごとに Table 2 で示される慣性モーメントの慣性負荷を取り付けている。

次の実験として、目標停止角度を変更させた場合の行き過ぎ量の低減について、目標停止角度を 90, 180 deg と変化させ実験を行う。

Table 2 Inertial moment of inertial loads.

Load	Inertial moment($\times 10^{-4}$) [Nms ² /rad]
No Load	0.00
Load 1	0.05

3.2 実験結果

実験によって得られた応答波形の結果を示す。

パルス周波数 100, 500, 1000 pps の結果を Fig.3, Fig.4, Fig.5 に示す。それぞれの図中(a)には、慣性負荷として No Load で駆動したときの結果、(b)には Load 1 を装着して駆動したときの結果を示す。さらに、それぞれの図の(a1), (b1)には、応答波形の全体図を示し、(a2), (b2)には、停止角度付近の応答波形をそれぞれ示す。

また、Fig. 6 にはパルス周波数 900 pps において目標停止角度を変更させた場合の結果を示す。それぞれの図中(a)には目標停止角度 90 deg で駆動した時の結果、(b)には目標停止角度 180 deg で駆動した時の結果を示す。それぞれの図の(a1), (b1)には、応答波形の全体図を示し、(a2), (b2)には、停止角

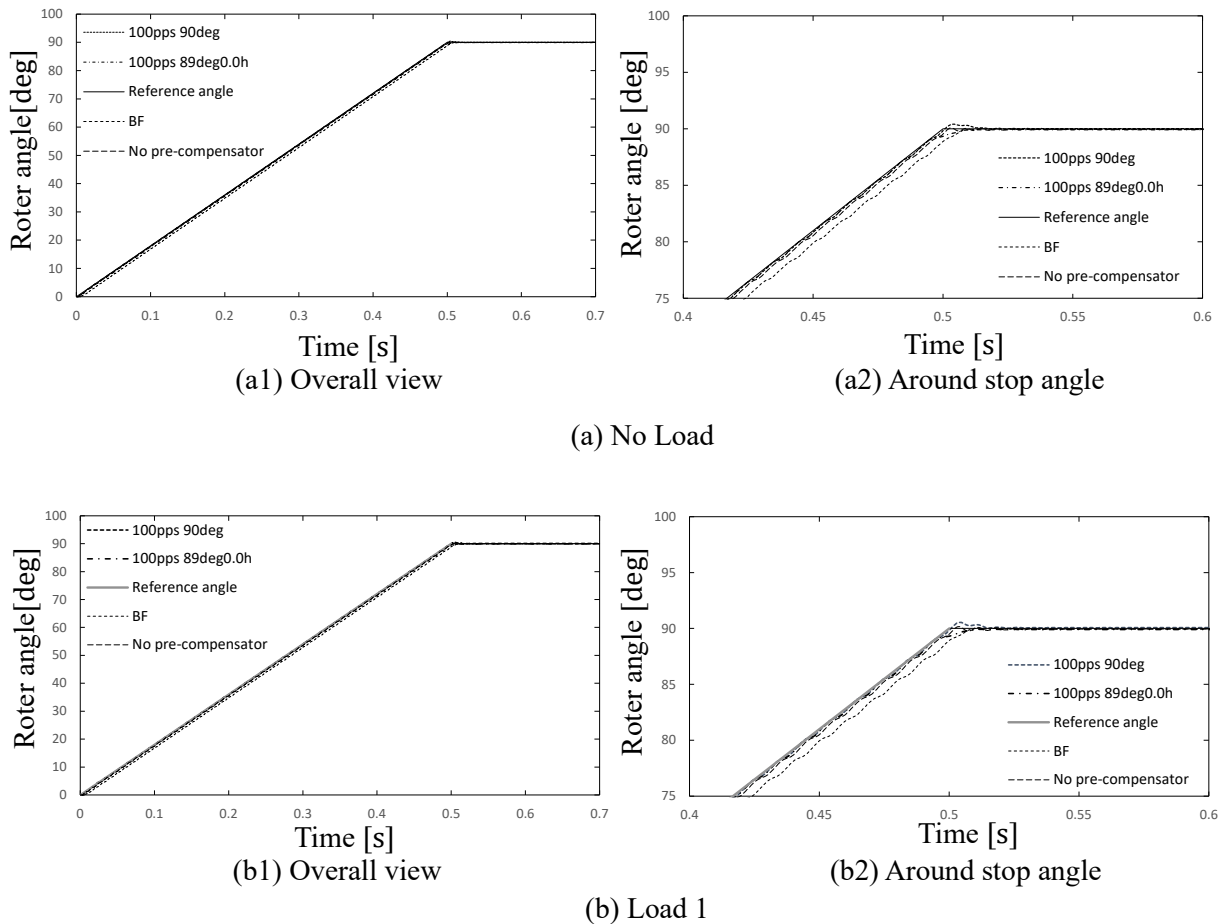


Fig. 3 Reference and response waveform using pre-compensator. (100 pps)

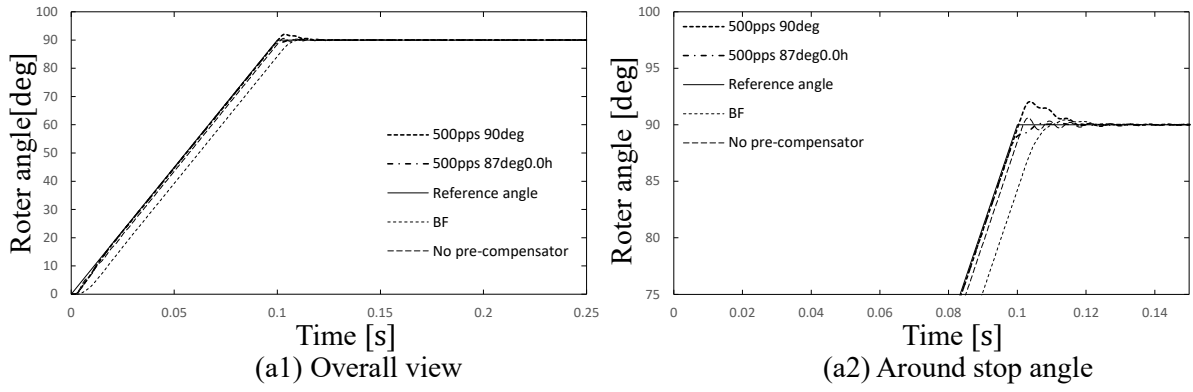
度付近の応答波形をそれぞれ示す。

Fig. 3 (a1)を見ると、目標停止角度よりも前の 89 deg にて定数 $h = 0$ とした際の応答波形と目標波形との大きな追従誤差は見受けられなかった。次に(a2)を見る。目標停止角度付近では目標波形との追従誤差はあるものの先行研究と比較して行き過ぎ量は低減していることが確認される。次に、Load 1 を装着させた場合である(b)について確認を行う。全体図である(b1)を見ると(a1)のときと同様に大きな追従誤差は確認されなかった。また、(b2)についても見ると、(a2)と同様に行き過ぎ量が低減されていることが確認される。このことから、このパルス周波

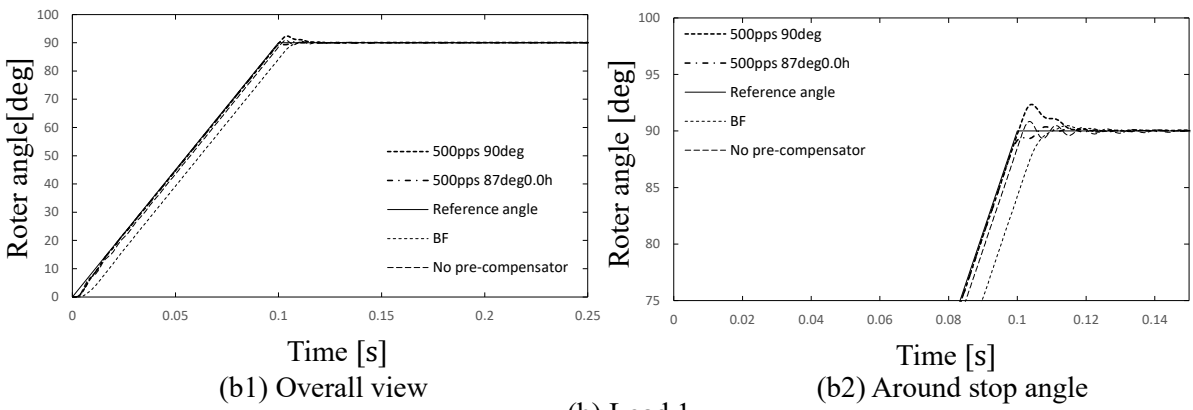
数では慣性負荷を変更させても行き過ぎ量の低減に大きな変化は見受けられないことが分かる。

次にパルス周波数を 500 pps へと変化させた場合の応答波形 Fig.4 について、(a1)を確認すると目標停止角度よりも前の 87 deg にて定数 $h = 0$ とした際の応答波形と目標波形に大きな追従誤差は確認されなかった。次に(a2)を見る、100 pps の時と同様に、応答波形の行き過ぎ量は低減されていた。

次に、Load 1 を装着させた場合である(b)について確認を行う。全体図である(b1)を見ると目標停止角度付近での追従誤差が確認される。また、(b2)についても見ると、

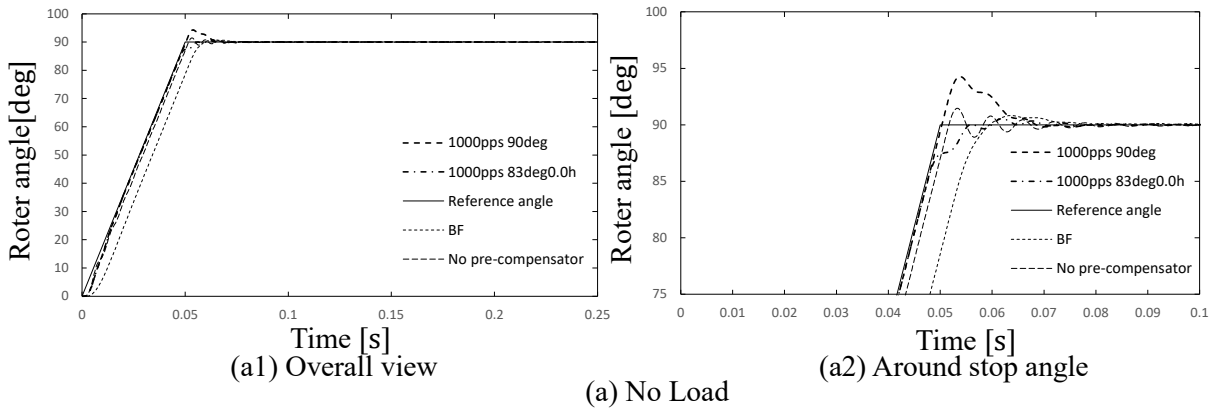


(a) No Load

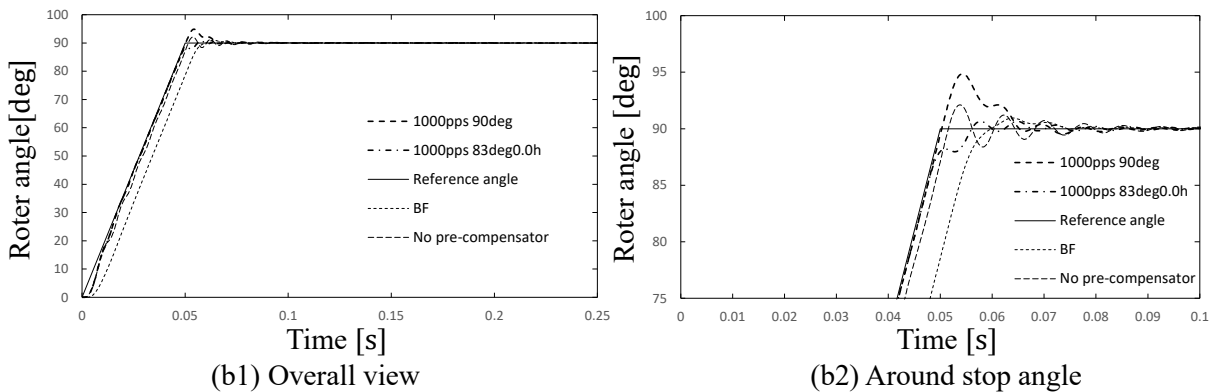


(b) Load 1

Fig. 4 Reference and response waveform using pre-compensator. (500 pps)



(a) No Load



(b) Load 1

Fig. 5 Reference and response waveform using pre-compensator. (1000 pps)

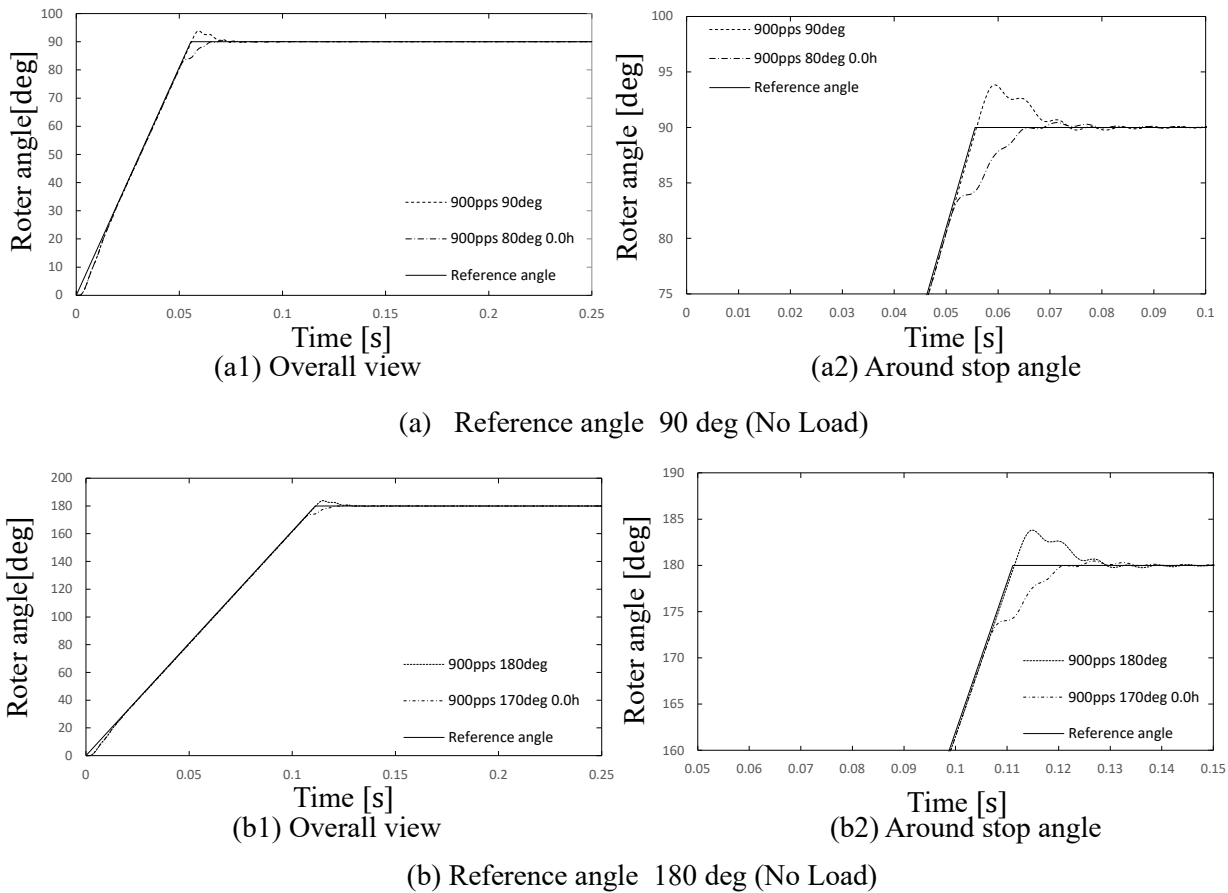


Fig. 6 Reference and response waveform using pre-compensator. (900 pps)

(a2)と同様に行き過ぎ量が低減されていることが確認される。Table 3 の実験条件であるパルス周波数を 100 pps から 500 pps まで変化した応答波形について同様に確認を行ったが、どの結果においても行き過ぎ量の低減が確認された。また、目標停止角度付近での応答波形は先行研究と比較して滑らかでないことが分かる。

次にパルス周波数を 1000 pps へと変化した場合の応答波形 Fig.5 について、これまでの実験結果と同様に 83 deg にて定数 $h = 0$ とした際に行き過ぎ量の低減が確認される。この結果からパルス周波数の値によって、追従誤差を除去するために設定された定数 $h = 0$ とする最適な角度は異なることが確認

された。

また、別の実験結果として、目標停止角度を変化させた場合についての応答波形が Fig.6 となる。目標停止角度 180 deg において、目標停止角度よりも手前の角度である 170 deg にて定数 $h = 0$ としたところ行き過ぎ量の低減が確認された。このことから目標停止角度が異なる場合でも、その目標停止角度の手前の角度において $h = 0$ とすることで、目標波形に対して追従誤差を抑えつつ、行き過ぎ量の低減が可能であり、パルス周波数、および、目標停止角度の値によって $h = 0$ とする最適な角度は異なることが再度確認できた。

今回得られた追従誤差、および、行き過

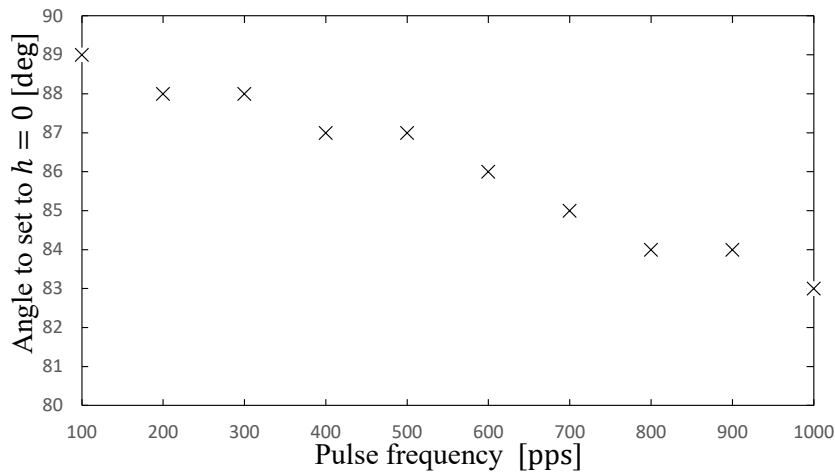


Fig. 7 Angle to set to $h = 0$ for pulse frequency. (Reference angle 90 deg)

ぎ量を低減する手法として、目標停止角度 90 deg の手前で $h = 0$ とする角度について、パルス周波数 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 pps と条件を設計した際の遷移図が Fig.7 となる。

Fig.7 の結果に関して、今回は角度を 1 deg ごとに設定したため階段状ではあるが、パルス周波数と目標停止角度 90 deg の手前で $h = 0$ とする角度は線形となることが予想される。そのため、目標値であるパルス周波数に対する予測値である $h = 0$ とする角度が得られると考えられる。

4. おわりに

本研究では、マイクロステップ駆動させたとき、目標停止角度より前の角度で定数 $h = 0$ とすることで、追従誤差、および、行き過ぎ量が低減できるか実験により検討を行った。結果より、目標停止角度に対して手前の角度において $h = 0$ とすることで、目標波形に対して追従誤差を抑えつつ、行き

過ぎ量の低減が可能であることがわかった。また、これは、慣性負荷を装着させた場合でも同様に可能であることを確認できた。しかし、目標停止角度付近での応答波形は先行研究と比較して滑らかでないことが問題点として挙げられる。

今後の課題は、慣性負荷と目標停止角度を変更させた場合の応答波形の改善である。

謝辞

秋田大学大学院理工学研究科の三浦武准教授におきましては、本研究に関して多くの御助言を頂きました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 見城 尚志: ステッピングモータとマイコン制御, 総合電子出版社 (1994)
- 2) 百目鬼 英雄: ステッピングモータの使い方, 工業調査会 (1993)
- 3) 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, 電気学会論文誌 D, **120**-12, 1462/1470 (2000)

- 4) K. Matsuo, T. Miura, K. Tajima: Vibration reduction of a stepping motor using a pre-compensator to remove control delay, IEEJ Journal of Industry Applications, **9**-2, 191/192 (2019)
- 5) D.-W. Peng, T. Singh, M. Milano: Zero-phase velocity tracking of vibratory systems, Control Engineering Practice, **40**, 93/101 (2020)
- 6) K. Matsuo and T. Miura: Tracking error elimination of a stepping motor using a ramp-following pre-compensator, 電気関係学会東北支部連合大会, 1C05 (2023)