

RNA による HB 形ステッピングモータの動特性解析に関する研究
Study on Dynamic Analysis of Hybrid Stepping Motor
Based on Reluctance Network Analytical Model

○松田裕斗*, 鎌田拓朗 *, 田島克文 *, 三浦 武*, 松尾健史*

○Yuto Matsuda*, Takuro Kamata*, Katsubumi Tajima*, Takeshi Miura*, Kenshi Matsuo*

*秋田大学

*Akita University

キーワード : 磁気抵抗回路網解析(RNA), HB 形ステッピングモータ, 動特性解析
(Reluctance network analysis (RNA), Hybrid stepping motor, Dynamic Analysis)

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 工学資源学研究科
松田裕斗, Tel. : (018)889-2337, Fax. : (018)837-0406, E-mail : m9012153 @wm.akita-u.ac.jp

1. はじめに

モータは産業界において、原動機として重要な役割を果たす一方、エレクトロニクス技術の進歩により、様々なモータの高性能制御が可能となり、制御用モータの重要性が増している¹⁾。

ステッピングモータは、この制御用モータに分類され、固定子励磁を順次切り替えることで一定の角度ずつステップ状に回転する。また、指令パルスの総数および周波数により回転角度、回転速度を制御できる特長がある。これにより、速度、位置決め制御が可能で開ループ制御のモータといえる。この特長を生かし、現在では事務処理作業の合理化および処理能力向上を目的

とし OA 機器や、生産工場の自動化、省力化を目的とし FA 機器を主とし、他には医療機器、計測器、自動車、遊技機器など多くの分野で活躍している¹⁾。

しかしステッピングモータは高速な位置決め要素として用いる際に、その回転子の振動が問題となる。回転子の停止位置であるトルク平衡点付近で脱調や整定時間の増大といった問題が起こる。これに対し、回転子振動の抑制法の一つとして各相の励磁電流を制御して回転子の停止位置となるトルク平衡点を微小量ずつ移動させ、基本ステップ角を細分化して駆動を行うマイクロステップ駆動法²⁾などが提案されているが、これらの手法は既存のモータに対して最適なマイクロステップパターンを決定するも

のであり、シミュレーションによる根本的な振動抑制を検討するものではない²⁾。このようなシミュレーションを行うためにはモータ単体だけではなく駆動回路や制御系を含めたシミュレーションが必要不可欠となる。これまでに三次元有限要素法を用いて HB 形ステッピングモータの解析を行った事例はあるが、回転体の運動まで考慮した連成解析までは行われていない³⁾。

これに対し筆者らは、永久磁石モータやリラクタンスモータの解析において有効性が報告されている、解析対象を細分化して各要素を適切な磁気回路で表現し、全体を磁気抵抗回路網として解析する、磁気抵抗回路網解析(Reluctance Network Analysis : RNA)を HB 形ステッピングモータの解析に適用した。これまで本モータの回転子および固定子、そしてエアギャップの解析モデルの検討が行われ、回転子拘束時のモデルを作成してきた。また、モータ構造の回転対称性を用いてモデルの小型化を行い、計算時間の短縮を図った⁴⁾。

本稿では、本モータの回転子拘束時における解析モデルから求めた特性を用いて、HB 形ステッピングモータの駆動時におけるシミュレーションについて検討を行い、速度トルク特性を算出したので報告する。

2. HB 形ステッピングモータの基本構成

2.1 回転子構造

本研究では解析対象として、オリエンタルモーター社製の 2 相 HB 形ステッピングモータ PK244-02B を用いた。モータ概略図を図 1 に示す。図より、回転子は 2 つの円筒型の電磁鋼板の間に円盤状のネオジウム磁

石が入っており、電磁鋼板とネオジウム磁石を貫通する形で回転軸が配置されている。回転子表面は歯が 50 個施されており、N 極側と S 極側では歯が 1/2 ピッチずれて配置されており、複雑な構造を有する。

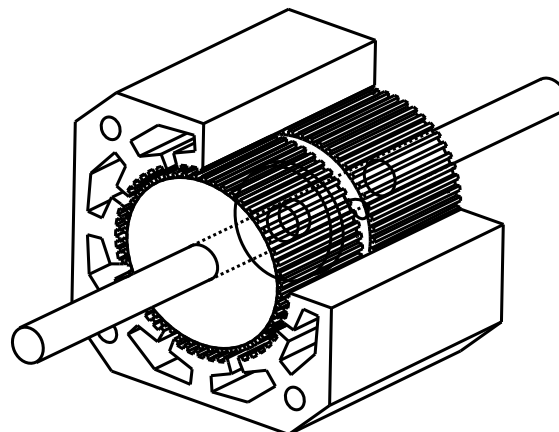


図 1 HB 形ステッピングモータの概略図

Fig. 1 Schematics of hybrid stepping motor.

2.2 固定子の構造

固定子および回転子の概略図を図 2 に示す。本モータの固定子は、回転子と同様に歯を有している。各固定子極に歯が 6 つ存在しており、この極が円周方向に 8 つ存在する。また、固定子も電磁鋼板で形成され各極には巻線が施されている。表 1 に、ステッピングモータの仕様を示す。

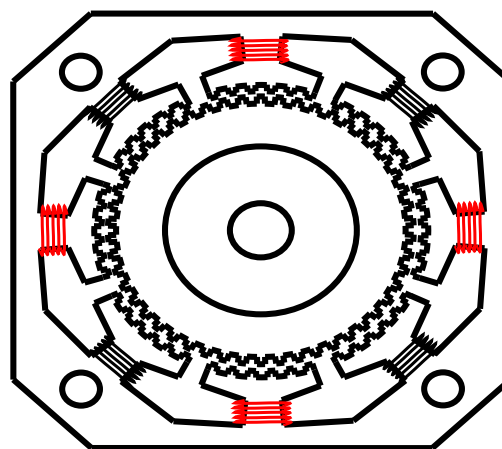


図 2 HB 形ステッピングモータの固定子

Fig. 2 Rotor surface of hybrid stepping motor.

表 1 ステッピングモータの仕様

Table 1. Specifications of stepping motor.

Rated voltage	6.0 [V]
Rated current	0.8 [A]
Holding torque	0.26 [N · m]
Number of winding/pole	64 [turns]
Winding resistance/phase	7.875 [Ω]
Step angle	1.8 [deg.]

3. RNA による回転子拘束時のモデル

従来の研究より、回転子および固定子、エアギャップ部分の磁気回路モデルの導出が行われた。そして、回転対称性を用いて 1/2 領域のモデルを導出し、要素数の低減による計算時間の短縮を図った。

3.1 RNA モデルの導出

まず、回転子モデルに関して、本モータの回転子は回転子歯が 50 個存在するため、図のように周方向に 100 分割し、径方向を 4 分割とした。

次に、固定子モデルに関して、本モータの固定子は極が 8 本、各固定子極に歯が 6 つ存在する。この極が円周方向に 8 つあるため、固定子の歯および磁極間空気部分の分割に関しては周方向に 96 分割する。また巻線が挿入される部分は周方向に 32 分割し、それ以外は周方向に 16 分割する。そして、径方向は小歯部を 1 分割とし、小歯部以外を 4 分割とする。奥行方向は、中心から左右方向に回転子部分を片側 2 層、空気の層を片側 1 層とし、永久磁石の層を 1 層として 7 分割とする。奥行方向の空気層の厚みは、回転子軸の長さと同回転子外側の固定子カバーの厚みにより設定する。分割図を図 3,4 に示す。分割された各要素は、図 5

に示すような三次元単位磁気回路モデルで表現される。この単位磁気回路は径方向、周方向、軸方向に 2 つずつ磁気抵抗を配置し、6 方向の磁束の流れを表せる。図中の磁気抵抗は(1)式により求める。

$$R = \frac{l}{\mu_0 \mu_s S} \quad (1)$$

(1)式に関して、 μ_0 は真空の透磁率、 μ_s は材質の比透磁率、 S は断面積、 l は磁路長である。

そして、モータの回転対称性を用いて、モデルの小型化を行った。本モータは回転対称性により、180 度で同じ磁束分布が現れる。図 6 のように周方向に 1/2 領域のみの解析モデルの導出を行い要素数の低減による計算時間の短縮を図った⁴⁾。

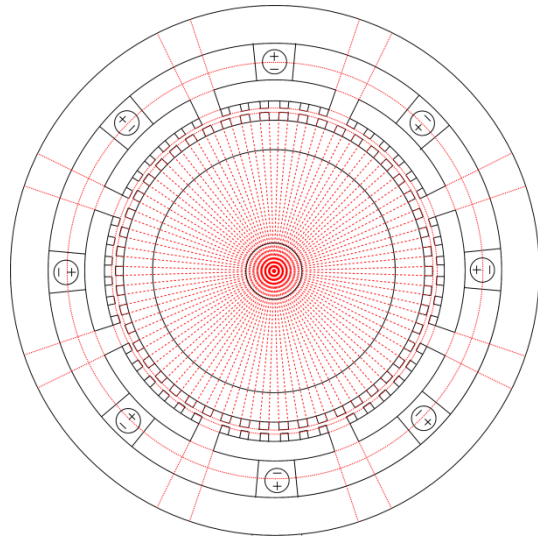


図 3 モデルの円周-半径方向分割図

Fig. 3 Circumference and radial division chart of model.

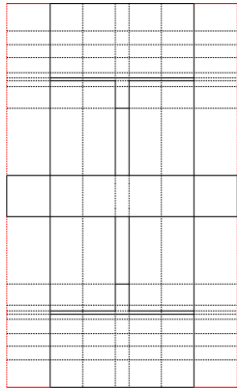


図4 モデルの軸方向分割図
Fig. 4 Axially division chart of model.

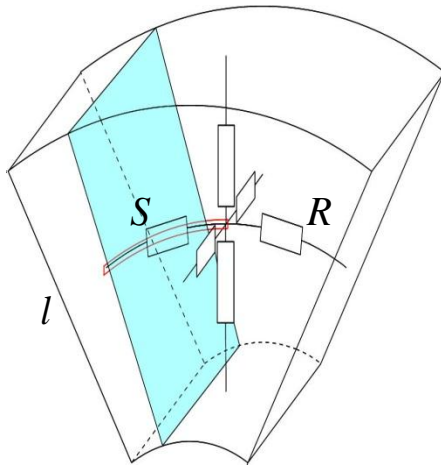


図5 三次元単磁気回路モデル
Fig. 5 3-D unit magnetic circuit model.

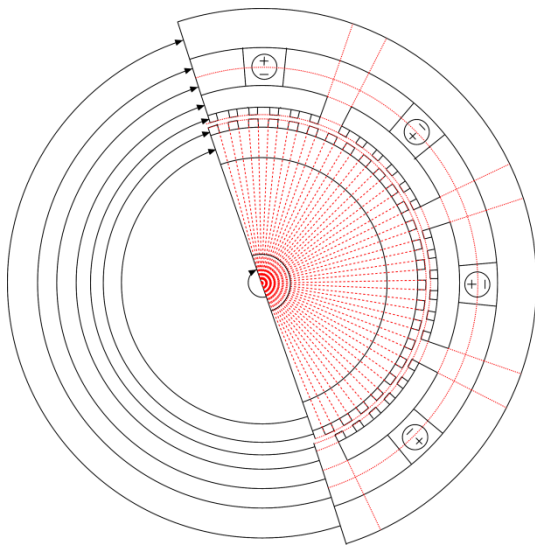


図6 1/2領域におけるモデルの分割図
Fig. 6 Division chart of half area model.

回転子と固定子間のエアギャップの分割については、磁束が径方向にのみ流れるものとした。ここでは、固定子の歯の幅と回転子の歯の幅を用いて分割している。そして、固定子歯とその隣の空気との境界から回転子に向けて垂線を下ろし、回転子歯とその隣の空気との境界から固定子に向けて垂線を下ろす。この二種類の垂線によって空隙部を分割する。分割された要素それぞれに対し図の磁気回路で置き換える。

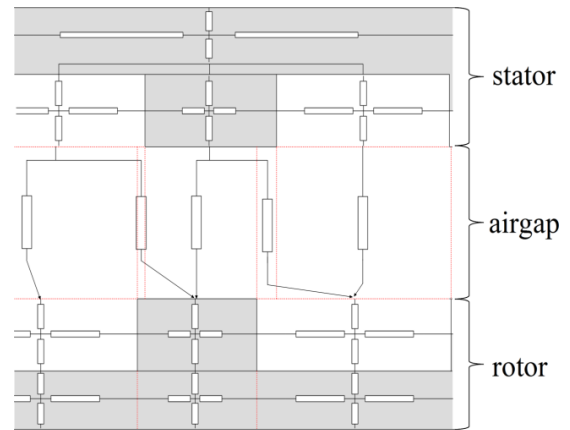


図7 エアギャップの磁気回路
Fig. 7 Magnetic circuit of airgap.

3.2 永久磁石の磁気回路表現

永久磁石は等価電流法の考えに基づいてモデル化した。具体的には永久磁石の残留磁束密度を等価電流により表現し、磁気回路上は起磁力源とみなした。図8に等価電流法における永久磁石の解析モデルを示す。ともに断面積はS、厚みはlである。図8の永久磁石は本研究対象の回転子に使用されている磁石と同様に円筒状で軸方向に磁化されているものとして考える。永久磁石と永久磁石モデル両方から同じ残留磁束密度が得られるように磁化 H_m を求め、この磁化から起磁力 F を求めた。

$$H_m = \frac{B_r}{\mu_0 \mu_r} \quad (2)$$

$$F = H_m l = \frac{B_r l}{\mu_0 \mu_r} \quad (3)$$

実際の磁気回路上では図 9 のようにこの等価電流による起磁力と永久磁石の磁気抵抗によって永久磁石を表現した。 μ_r はリコイル透磁率である。

$$i = F = H_m l = \frac{B_r l}{\mu_0 \mu_r} \quad (4)$$

$$R = \frac{l}{\mu_0 \mu_r S} \quad (5)$$

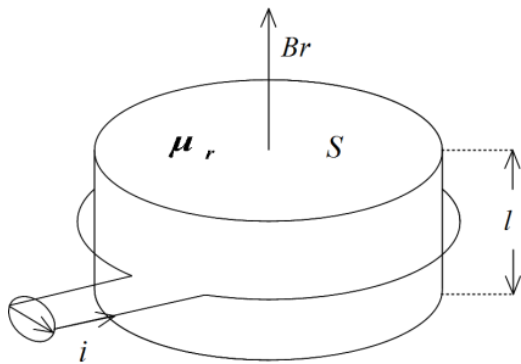


図 8 永久磁石解析モデル

Fig. 8 Analytical model of permanent magnet.

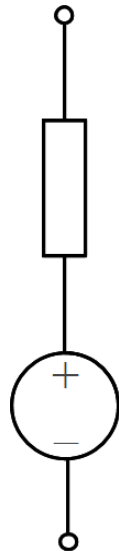


図 9 永久磁石の磁気回路モデル

Fig. 9 Magnetic circuit model of permanent magnet.

3.3 回転子拘束時における特性算出

ステッピングモータの回転子駆動時における等価回路の作成にあたり、HB 形ステッピングモータの巻線インダクタンスおよび非励磁状態における極を貫く磁束といった 2 つの特性が必要となる。

3.3.1 巻線におけるインダクタンスの算出

本モータは、リラクタン্সモータと同様に巻線におけるインダクタンスがトルクの値に影響を及ぼす。そのため、ステッピングモータの動作時のシミュレーションを行うにあたり、巻線におけるインダクタンスが必要となる。この特性を求めるため、まず回転子拘束時のモデルにより計算を行い、電圧および電流波形を算出した。これらよりインピーダンス Z を求め、この値および巻線抵抗値 R を用いて(6)式よりインダクタンス L を求める。

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{2\pi f} \quad (6)$$

3.3.2 極を貫く磁束の算出

永久磁石による磁束の流れを図 10 に示す。回転子拘束時におけるモデルにより計算を行い、各回転角度における磁束を算出した。(7)式より ϕ_M を求め、図 11 のような正弦波とした。ここでは、回転子歯と対向している状態を回転角 $\theta = 0$ 度とし、回転子を基本ステップ角である 1.8 度時計方向に回転させた状態を $\theta = 1.8$ 度とした。

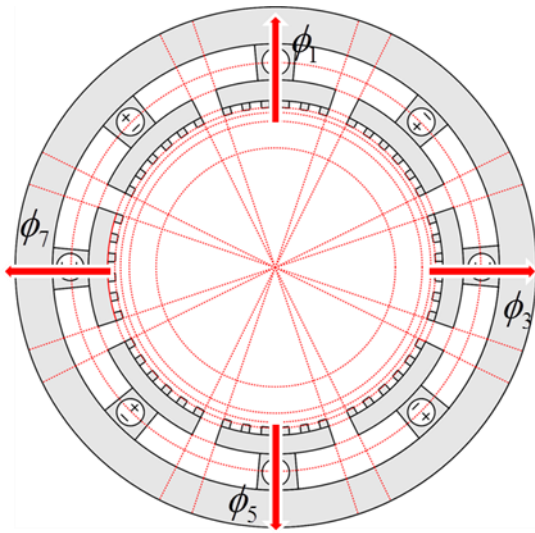


図 10 永久磁石による磁束の流れ
Fig.10 Flow of the magnetic flux of the permanent magnet.

$$\phi_M = \phi_1 - \phi_3 + \phi_5 - \phi_7 \quad (7)$$

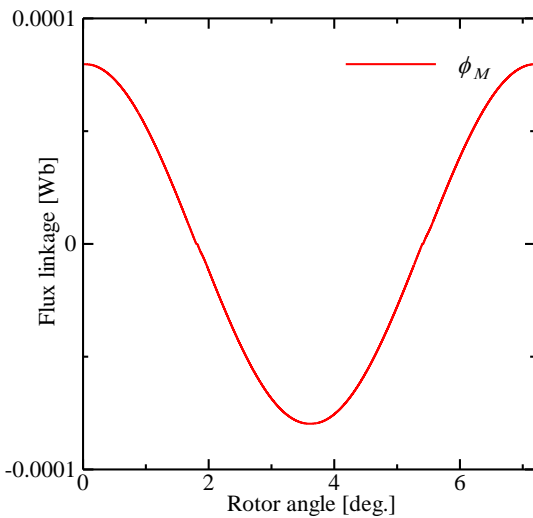


図 11 回転角度における磁束の変化
Fig. 11 Magnetic flux in the rotor angle.

4. 回転子駆動時の等価回路モデル

3.3.1 および 3.3.2 で求めた巻線インダクタンスと永久磁石の誘導起電力により、HB 形ステッピングモータの駆動時における等価回路を作成した。

4.1 回転子駆動時の等価回路モデル

HB 形ステッピングモータの回転子駆動時における等価回路を図 12 に示す。同図中において、巻線は誘導起電力、巻線インダクタンス、巻線抵抗で表現される。ここで、巻線インダクタンス値は 3.3.1 より求めた。各回転角度における巻線インダクタンスを算出後、その平均値を計算により求め、 $L=14.07 \text{ mH}$ とした。また、誘導起電力は 3.3.2 より、図 11 のような正弦波を(8)式で微分することにより計算を行っている。そして、巻線抵抗値は $R=7.875 \Omega$ とした。また、トランジスタに入力として、方形波パルスを与えた。

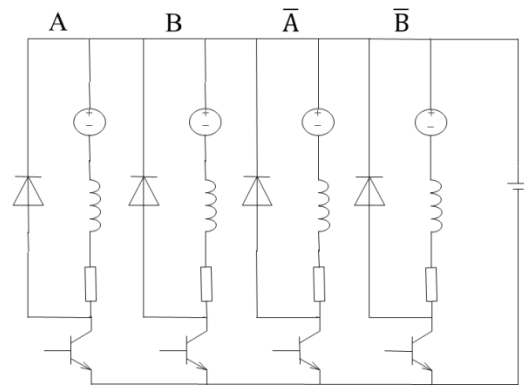


図 12 回転子駆動時の等価回路モデル
Fig. 12 Equivalent circuit model of the rotor when driving.

$$V = -n \frac{d\phi}{dt} \quad (8)$$

4.2 励磁方法

今回のシミュレーションにおける励磁方法として 1 相励磁を用いた。1 相励磁方式を図 13 に示す。この励磁方式は、常に 1 相だけに電流を流す方式であり、ステップ角は使用するモータの基本ステップ角となる。また、この方式は励磁される相が常に一つだけとなる。

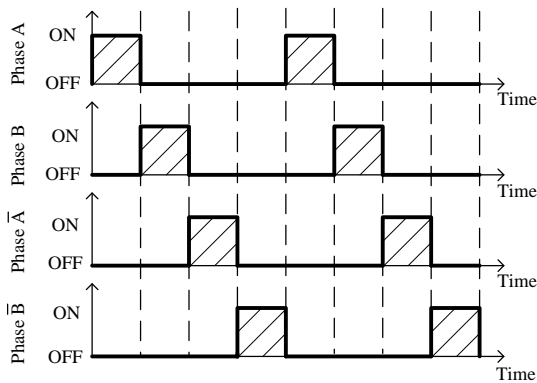


図 13 1 相励磁方式

Fig. 13 1 phase excitation.

4.3 速度-トルク特性の算出

図 12 に示す回転子駆動時における等価回路モデルで、入力電力 P および銅損 I^2R を算出し、(9)式よりトルクを求めた。ここで、 ω を角速度とした。以上より、速度-トルク特性を算出し、その結果を図 14 に示す。同図より、60rpm から 240rpm にかけて急峻なトルクの減少となった。そして、480 rpm, 960 rpm, 1920 rpm の時にトルクがマイナスの値となった。この要因について、回転速度の変化による巻線間の電圧波形、電流波形を算出することで検証した。図 15 より、60 rpm 時は電圧波形と電流波形の位相が一致しているが、480 rpm 時は電流波形が電圧波形に対して遅れていることが分かった。

$$\tau = \frac{P - I^2R}{\omega} \quad (9)$$

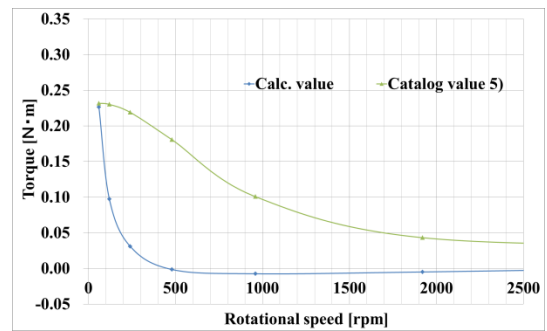
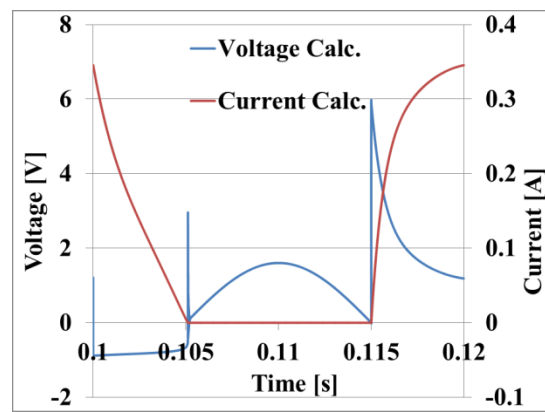
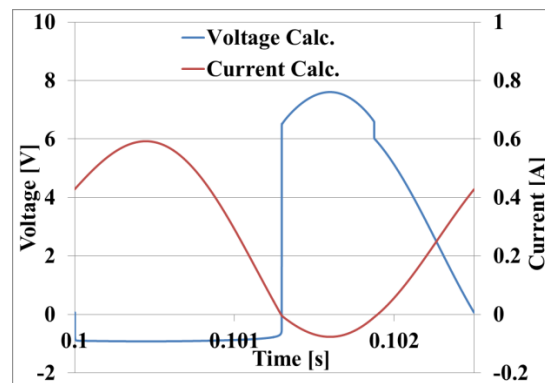


図 14 速度-トルク特性

Fig. 14 Speed torque characteristics.



(a) 60 rpm 時



(b) 480 rpm 時

図 15 巻線間の電圧波形および電流波形

Fig. 15 Voltage and current waveforms between the windings.

5. おわりに

本稿では、HB 形ステッピングモータの回転子駆動時における等価回路モデルを作成し、トルク-速度特性を算出した。この特性により回転速度が上昇するにつれ、巻線間

の電圧波形に対して、電流波形の遅れが生じていることが分かった。今後の課題としては、適切な励磁を与えて速度-トルク特性の算出を行い、モデルの改良を検討する必要がある。

orien-sougou/Book/orien-sougou-P0904.html

謝辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり、御指導、御鞭撻を賜りました本学電気電子工学専攻、共同ライフサイクルデザイン工学専攻、並びに秋山宜万技術長、伊藤慶郎技術職員に対し、心より敬意と感謝の意を表します。

最後に本研究室の大学院生並びに学部生の皆様に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 百目鬼英雄：ステッピングモータの使い方，pp.7-13，工業調査会（1993）
- 2) 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振動の抑制」，電学論 D，120，12，pp.1462（2000）
- 3) 河瀬順洋・山口 忠・増田達哉・百目鬼英雄・小堀 勝：「三次元有限要素法にハイブリッド形ステッピングモータのトルク特性解析」，電学論 D，123，4，pp.330-336（2003）
- 4) 福地遼介・田島克文：「周期境界条件を用いた HB 形ステッピングモータの RNA モデルに関する基礎的検討」，電気学会マグネティクス研究会資料，MAG-12-111，pp13-18（2012）
- 5) オリエンタルモーター株式会社：
<http://www.mekatoro.net/digianaecatalog/>