磁気吸引浮上機能を有する二形式のステップモータ

正員 樋口 俊郎 (東大生研)

正員 川勝 英樹 (東大生研)

Two Types of Magnetically Suspended Stepping Motors

Toshiro Higuchi, Member, Hideki Kawakatsu, Member, (University of Tokyo)

The authors have developed two types of stepping motors with a function of magnetic suspension. Since the motors have, in their relatively simple and compact structure, the function of magnetic suspension and positioning at once, they are suitable for use in cleanrooms, vacuum chambers and hostile environments. Due to the characteristic toothed pole structure of the motors, attractive force fluctuation per tooth is inevitable as the motors are propelled. However, the authors have succeeded in designing the motors so that the sum attractive force becomes relatively constant and insensitive to the position of the slider in the direction of propulsion, resulting in the realisation of stable suspension by a conventional servo circuit used for ordinary magnetic bearings. The paper will discuss the following : (i) structure of two types of stepping motors ; (ii) magnetomotive force of coils ; (iii) attractive force calculation ; (iv) control circuit, (v) experiment and performance ; and (vi) comparison of two types.

キーワード：磁気吸引浮上，ステップモータ，スーパクリーン，アクチュエータ

1. 緒言

半導体の製造，バイオテクノロジーの実験，真空中のプロセスなどにおいて，じんあいや油飛まつが存在は製品の歩留りや実験の信頼性を大きく左右する。そのため，製品や試料のじんあいによる汚染を最小限にとどめることが重要な問題となっている。この課題に対して著者らは原理的にじんあいや油飛まつを発生しないクリーンなモータの開発を進めている。著者らは，ステップモータにおいて推力と垂直な方向に生じる，スライダ鉄心とステータ鉄心間の吸引力の存在に着目し，その力をギャップセンサの出力をもとに制御することを試みた。その結果，スライダ鉄心を磁気吸引浮上により非接触に支持し，かつ推進させることに成功している⁽¹⁾。開発したモータは，ステップモータとしての駆動位置決め機能と磁気吸引浮上機構としての非接触案内機能を同時に有するものであるため，種々の形態のアクチュエータや搬送機構を比較的小コンパクトに構成することが可能となる。今回，今までに磁気吸

引浮上機能を確認しているステップモータの磁極構造とコイル起磁力の設定に変更を加えることにより，磁極構造上は従来の四相 VR（バリアブルリラクタンス）形と同一のステップモータの浮上に成功した。両者の構造，制御，特徴の比較を通じ，両者の類似点と相違点，利点と欠点などを明らかにする。本論文においては以下の3項目について順に述べる。

(1) 磁気吸引浮上機能を有するステップモータの構造を二形式示し，両者が磁的に等価であること，両形式の磁気吸引浮上制御回路をスライダ鉄心の推力方向の位置の情報をを用いずに構成しても安定な浮上が実現できることを吸引力の解析に基づいて明らかにする。

(2) 二形式のステップモータの磁気吸引浮上制御および駆動位置決め実験を行い，前項目の内容を確認する。

(3) 二形式のステップモータの利点，欠点などを比較する。なお，二形式のステップモータの各名称は，モータの磁束構成が基本的に PM 形（永久磁石

形) リニアステップモータと同一の形式をバイアスコイル形, 他方を VR 形 (バリアブルリラクタンス形) とする。

2. 基本構想

〈2・1〉 一般的磁気吸引浮上機構の構造と制御方法

図1を用いて一般的磁気吸引浮上機構の構造と制御方法を説明する。図1によって XY 座標を定義する。 X 軸をスライダ鉄心の移動方向, Y 軸をギャップ方向とする。スライダ鉄心は U 字形の鉄心にコイルを巻いた電磁石であり, ステータ鉄心は X 軸に沿った鉄の平板である。図1の系は制御を行わないと Y 方向に不安定な系であるため, 一定の浮上ギャップ y を保つためには適当な制御系と制御パラメータを設定することが必要である。図2に例として, 比例微分制御による方法を示す。この制御方法では, あるバイアス電流とギャップのもとで電磁石の電流-吸引力特性を線形近似したうえで電流を制御入力, ギャップを制御対象と考えている。一般に, スライダ鉄心の X 方向の位置 x は吸引力に影響しないため, 浮上制御に x の値は用いられていない。以下に回路の説明を行う。ギャップセンサの出力 d とギャップ設定値 d_0 の

図1 一般的磁気吸引浮上機構の構造
Fig.1. Schematic of a conventional magnetic suspension system.

P : 比例アンプ, D : 微分アンプ, A : 電流増幅アンプ
 d : ギャップ値, d_0 : ギャップ設定値, b : バイアス起磁力設定用信号

図2 磁気吸引浮上制御回路の例
Fig.2. An example of a magnetic suspension control circuit.

差を比例アンプ P と微分アンプ D に入力し, それぞれの出力の和にバイアス信号 b を加える。バイアス信号 b は, ギャップ d_0 の時の吸引力と浮上体の重量が釣り合うように定める。得られた信号を1台のユニポラ定電流アンプにより増幅し, バイアスコイルに与える。以上の回路において適当なフィードバックゲインを設定することにより, スライダ鉄心の磁気吸引浮上が実現される。

〈2・2〉 磁気吸引浮上ステップモータの基本構想

ステップモータのスライダ鉄心とステータ鉄心は, 推力を発生するために歯構造を有する。この歯の存在はスライダ鉄心の X 方向への移動に伴い吸引力の変動を生じ, その結果, 浮上制御が〈2・1〉節で述べたような電磁石と比べてより難しくなる可能性がある。しかし著者らは, 磁気吸引浮上形ステップモータの開発にあたり, 図2に示したような比較的簡単な制御回路でスライダ鉄心の安定な浮上を実現することを目指した。そのためにステップモータの構造と各コイルの起磁力などを工夫し, スライダ鉄心の X 軸方向への変位が浮上制御にほとんど影響しないようにした。具体的には, 浮上制御のためには鉄心にバイアス磁束を流し, その磁束をギャップセンサ出力をもとに制御し, 駆動位置決めのためにはバイアス磁束に正弦波状のミニステップ駆動磁束を重ね合せた。上記の要件を満足するリニアステップモータとして以下で述べる2つの形式が考えられる。

3. 構造と等価回路

図3, 図4を用いて磁気吸引浮上機能を有するステップモータ二形式の構造とその等価回路の説明を行う。図3をバイアスコイル形, 図4をVR形と呼ぶことにする。図3, 図4の両形式において, スライダ鉄心には4個の磁極子 $T1, T2, T3, T4$ があり, それらの位置の位相の関係は, ステータ鉄心の歯の1ピッチを電気角 2π (rad) とすると, $T1$ を 0 rad とした場合, $T2$ は π (rad), $T3$ は $-1/2\pi$ (rad), $T4$ は $1/2\pi$ (rad) の関係になっている。ステータ鉄心は一定の歯ピッチを有する。また, スライダ鉄心の各磁極子の歯ピッチとステータ鉄心の歯ピッチは等しい。

〈3・1〉 バイアスコイル形の構造 バイアスコイル形のスライダ鉄心には直列に接続された2個のバイアス磁束発生用コイルと, 4個の駆動位置決めのためのコイル $A1, A2, B1, B2$ が巻かれている。コイル $A1$ と $A2, B1$ と $B2$ は互いに直列に接続されており, 一方がバイアスコイルの作るバイアス磁束と強め合う

(a) バイアスコイル形の構造
(a) Schematic of the bias-coil type.

(b) バイアスコイル形の磁気等価回路
(b) Equivalent circuit of the bias-coil type.

図 3
Fig. 3.

(a) VR形の構造
(a) Schematic of the VR type.

(b) VR形の磁気等価回路
(b) Equivalent circuit of the VR type.

図 4
Fig. 4.

磁束を発生するとき、他方は弱め合う磁束を発生する。バイアスコイルは1台のユニポーラ定電流アンプに接続される。コイル A1 と A2, B1 と B2 はそれぞれバイポーラ定電流アンプに接続される。図 3.b にバイアスコイル形の等価回路を示す。電池は各コイルの起磁力 U 、抵抗は各ギャップにおける磁気抵抗 R を表す。

〈3・2〉 VR 形の構造 VR 形のスライダ鉄心には 4 個のコイル A1, A2, B1, B2 が巻かれている。各コイルはそれぞれ独立に 4 個のユニポーラ定電流アンプに接続される。コイル A1, A2 の発生する磁束は上向き、コイル B1, B2 の発生する磁束は下向きである。図 4(b) に VR 形の等価回路を示す。ここで図 3 と図 4 を比較すると、図 4 の VR 形は図 3 のバイアスコイル形からバイアスコイルを取除いたものにほぼ等しいとみなすことができる。なお、図 3、図 4 の等価回路においては、以下の事項を仮定している。

- (i) 鉄心の磁気抵抗をギャップのそれに対して十分に小さいものとして無視し、すべての起磁力降下がギャップにおいて生じると考える。
- (ii) 鉄のヒステリシスを無視する。
- (iii) 鉄の磁気飽和を無視する。
- (iv) 漏れ磁束を無視する。

4. 磁気吸引浮上に適した各コイルの起磁力の設定

本章においては、バイアスコイル形および VR 形の各コイルの起磁力を定める。起磁力波形の決定においては、浮上制御が容易であること、ギャップ変動が少ないこと、浮上制御と駆動位置決めが独立に行えることなどを評価の基準とした。本章で定めた各コイルの起磁力が適当であることは第 5 章の吸引力計算および第 7 章の浮上実験を通じて確認される。

〈4・1〉 バイアスコイル形の各コイルの起磁力の設定 (1), (2) 式によってバイアスコイル形の各コイルの起磁力を定める。

$$U_{bias} = U_0 + \Delta U \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} U_{a1} &= k \times U_0 \times \cos(\omega \times t) \\ U_{a2} &= k \times U_0 \times \cos(\omega \times t) \\ U_{b1} &= k \times U_0 \times \sin(\omega \times t) \\ U_{b2} &= k \times U_0 \times \sin(\omega \times t) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 U_0 ：バイアス起磁力の初期設定値、
 ΔU ：バイアス起磁力の制御成分、 k ：定数、
 ω ：ミニステップ駆動波形の角振動数、 t ：時間

ここで、(1) 式で表されるバイアス起磁力 U_{bias} は、〈2・2〉節で述べた基本構想に従って、図 2 に示し

た磁気吸引浮上制御回路で与えることとした。すなわち、 U_0 は図2のバイアス信号 b で定まるバイアス起磁力 U_{bias} の初期設定値であり、 ΔU は比例アンプ P と微分アンプ D の出力の和で定まるバイアス起磁力の制御成分である。(2)式は駆動位置決めのための起磁力をあたえる。この駆動波形を用いた駆動方法は一般的にミニステップ駆動法と呼ばれる。この駆動法を採用した理由は、ステップモータの駆動に一般的に用いられているスイッチングによる方形歯状の起磁力を用いた駆動は安定な浮上にとって急激な外乱となると考えられたからである。 k はミニステップ駆動起磁力の振幅とバイアス起磁力初期設定値 U_0 との比を定める定数である。

〈4・2〉 VR形の各コイルの起磁力の設定 VR形において各コイルの起磁力を適当に選ぶことにより、バイアスコイル形とVR形が磁氣的にほぼ等価であるようにすることが可能であると考えられる。〈3・2〉節で述べたように、両形式を比較すると、バイアスコイル形からバイアスコイルを去除くとVR形になる。そこで、バイアスコイル形の4個のA,B相コイルにバイアス起磁力 U_{bias} を割振って、バイアスコイル自身の起磁力を0にすることを考える。以下の(3)式に従って各コイルの起磁力を定めると磁気等価回路において二形式が等価になる。

$$\left. \begin{aligned} U_{a1} &= U_{bias}/2 + k \times U_0 \times \cos(\omega \times t) \\ U_{a2} &= U_{bias}/2 - k \times U_0 \times \cos(\omega \times t) \\ U_{b1} &= U_{bias}/2 - k \times U_0 \times \sin(\omega \times t) \\ U_{b2} &= U_{bias}/2 + k \times U_0 \times \sin(\omega \times t) \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

上式右辺第1項の分子の U_{bias} は(1)式に従って定める。右辺第2項はミニステップ駆動の起磁力に相当する。定状態では U_{bias} は U_0 にほぼ等しいので、 k を0.5よりも小さな正の定数に定めれば、ユニポーラアンプ4台を用いて(3)式に相当する起磁力を発生することが可能となる。ここで、(3)式と図4で注意すべきことは、ユニポーラアンプを各コイルに接続する場合、コイルA1,A2の各アンプは両コイルが上向きの磁束を発生するように接続し、コイルB1,B2のアンプは下向きの磁束を発生するように接続する点である。

5. 磁気吸引力の計算

本章においては、図3(b)のバイアスコイル形ステップモータの等価回路を用いて y 方向の吸引力を計算する。計算結果に基づいて、第3章で定めたステップモータの構造と第4章で定めた各コイルの起磁力が

第2章の基本構想の要件に当てはまることが明らかにされる。

(1),(2)式と図3(b)の等価回路より各ギャップの磁束が求まる。一般に、外部磁束 ϕ_0 と鎖交する N 巻のコイルの電流が0から I まで変化したとき、その系の磁気随伴エネルギーは次式で与えられる⁽²⁾。

$$W = N \times \int_0^I \phi_0 di \dots (4)$$

上式より図3(b)の等価回路全体の磁気随伴エネルギー W が求まる。

$$\begin{aligned} W = & U_{bias} \times U_{bias} \times (p_1 + p_2) \times (p_3 + p_4) / (2 \times p_s) \\ & + U_{bias} \times U_a \times (p_1 - p_2) \times (p_3 + p_4) / p_s \\ & + U_{bias} \times U_b \times (p_3 - p_4) \times (p_1 + p_2) / p_s \\ & + U_a \times U_a \times \{4 \times p_1 \times p_2 + (p_1 + p_2) \\ & \times (p_3 + p_4)\} / (2 \times p_s) \\ & + U_a \times U_b \times (p_1 - p_2) \times (p_3 - p_4) / p_s \\ & + U_b \times U_b \times \{4 \times p_3 \times p_4 + (p_1 + p_2) \\ & \times (p_3 + p_4)\} / (2 \times p_s) \dots (5) \end{aligned}$$

ただし、 W :系の磁気随伴エネルギー、
 U_{bias} :バイアスコイルによるバイアス起磁力、 U_a, U_b :A,B相コイルの起磁力、 p_1, p_2, p_3, p_4 :各磁極子のパーミヤンス
($p_1=1/R1, p_2=1/R2, p_3=1/R3, p_4=1/R4$)
 $p_s: p_s=p_1+p_2+p_3+p_4$

ここで、(5)式のパーミヤンス p は、スライダ鉄心の駆動方向への変位 x 、ギャップ y 、歯幅、歯厚、歯厚の関数として求められる。本論文においては仮定磁路法(3)を用いてパーミヤンスを計算した。

スライダ鉄心に働く y 方向の吸引力および x 方向

F1: 磁極子 T1 に働く吸引力, ΣF: 吸引力総和

図5 計算された吸引力

Fig. 5. Calculated attractive force.

の推力は、磁気随伴エネルギー W の y および x による偏微分として表される。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \text{吸引力} &= -\partial W / \partial y \\ \text{推力} &= \partial W / \partial x \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

図5に(6)式から計算された吸引力を示す。計算においては、(1)、(2)式の定める起磁力を用いた。ただし、 $U_{\text{bias}} = U_0$ 、 $\Delta U = 0$ とした。図5は $k=1$ の場合で、スライダ鉄心が(1)、(2)式によって定まる位置決め安定点に存在する場合の計算結果である。 $F1$ 、 $F2$ 、 $F3$ 、 $F4$ は各磁極子に働く y 方向の力を表す。横軸は x /ピッチ、縦軸は無次元化された吸引力を表す。図5には、 $F1$ および $F1$ から $F4$ までの4力の和 ΣF が示されている。同図において、 X 方向への1ピッチの変位によって $F1$ が大きく変動することが見られる。力 $F2$ 、 $F3$ 、 $F4$ は図5に記入されていないが、それぞれ $F1$ と同じ波形を有し、第3章で述べた各磁極子と同様の位相関係をもつ。一方、 ΣF の x による変動は比較的小さいことが認められる。このことの理由は、各力の位相差のために吸引力が平均化されることから説明される。

バイアス起磁力 $U_{\text{bias}} = U_0$ を増減させると、 ΣF が x の変化による変動を比較的小さく保ったまま増減することが計算により確認された。このことは、バイアス起磁力の制御を x と関係なく行ってもステップモータの安定な浮上が実現できることを示しており、〈4・1〉節で述べたように、(1)式の U_{bias} を図2の一般的磁気吸引浮上制御回路で定めることが適当であることを示唆するものである。なお、VR形に関しても、(3)式と図4(b)の等価回路に関して上記と同様の計算を行うことにより等価な結果が確認されている。

6. 制御回路、駆動方法

本章においては、ステップモータの浮上制御方法及び駆動方法を説明する。第5章の計算の結果により、 x と独立な制御回路を用いてバイアス起磁力を制御しても安定な浮上が期待できる。そのため、以下に説明するような回路構成を採用した。

〈6・1〉 バイアスコイル形の制御回路 図6にバイアスコイル形の制御回路を記す。バイアスコイルの制御回路は図2に示したものと同一である。ギャップセンサの出力 d とギャップ設定値 d_0 の差を比例アンプ P と微分アンプ D に入力し、それぞれの出力の和にバイアス信号 b を加える。バイアス信号 b は、ギャップ d_0 のときの吸引力と浮上体の重量が釣合うように定める。得られた信号を4台のユニポーラ定電流アンプにより増幅し、4個のコイルに与える。モータの駆動方法としてはオープンループのミニステップ駆動法を用いる。具体的には、図7に示したように、浮上制御信号に正弦波と余弦波を直接加える。

図6 バイアスコイル形の制御回路
Fig. 6. Control circuit of the bias-coil type.

図7 VR形の制御回路
Fig. 7. Control circuit of the VR type.

うに定める。得られた信号を1台のユニポーラ定電流アンプにより増幅し、バイアスコイルに与える。駆動および位置決めには、 A 、 B 相コイルにオープンループでミニステップ駆動電流を流す。

〈6・2〉 VR形の制御回路 図7にVR形の制御回路を記す。ギャップセンサの出力 d とギャップ設定値 d_0 の差を比例アンプ P と微分アンプ D に入力し、それぞれの出力の和にバイアス信号 b を加える。バイアス信号 b は、ギャップ d_0 のときの吸引力と浮上体の重量が釣合うように定める。得られた信号を4台のユニポーラ定電流アンプにより増幅し、4個のコイルに与える。モータの駆動方法としてはオープンループのミニステップ駆動法を用いる。具体的には、図7に示したように、浮上制御信号に正弦波と余弦波を直接加える。

7. 2自由度実験装置によるリニアステップモータの磁気吸引浮上実験

本章においてはバイアスコイル形およびVR形ステップモータの磁気吸引浮上実験について述べる。なお、スライダ鉄心としてはバイアスコイル形のみを用いた。バイアスコイル形の実験では、図6の制御回路をバイアスコイルと4個のコイル $A1$ 、 $A2$ 、 $B1$ 、 $B2$ に接続し、VR形の実験では、バイアスコイルの端子をオープンにした状態で図7の制御回路を4個のコイル $A1$ 、 $A2$ 、 $B1$ 、 $B2$ に接続して実験を行った。

(7・1) 実験目的 以下に実験目的を列挙する。

(1) 図6および図7の制御回路を用いてスライダ鉄心を磁気吸引浮上によって支持し、かつ非接触な推進および位置決めができることを確かめる。浮上精度、位置決め後の安定度などを測定する。

(2) 駆動位置決めと浮上制御との干渉の程度を調べる。

(7・2) 実験装置および実験方法 図8に実験装置の構造を示す。この実験装置は、スライダ鉄心の推力方向および吸引力方向の2自由度のみ自由な運動が許されて、他の自由度をボールベアリングで拘束した装置である。水平なレール状のステータ鉄心の上を自由に動ける台車があり、その台車にスイングアームの回転軸が固定してある。スイングアーム先端には、バイアスコイル形リニアステップモータのスライダ鉄心と、ギャップ測定用のギャップセンサ（渦電流式、分解能 $1\mu\text{m}$ ）が固定してある。スライダ鉄心移動中のギャップ測定には浮上制御に用いているギャップセンサ出力を用いた。図6と図7の制御回路をそれぞれ被制御系に接続して実験を行った。

図8 二自由度実験装置構造
Fig. 8. Schematic of the 2-degree of freedom apparatus.

図9 VR形の浮上推進実験結果
Fig. 9. Magnetic suspension experiment result of the VR type.

一般的ステップモータの X 方向の位置決めは、 A, B 相起磁力の比を変化させることによって行われる。本論文で報告したステップモータも同様の方法で位置決めされるが、 A, B 相起磁力に加え合されるバイアス起磁力は制御によって微小ではあるが位置決め中も変動している。例えば、VR形の場合、(3)式の第2項を固定してスライダ鉄心の位置決めを行った後でも第1項は変動している。このバイアス起磁力の変動が位置決め精度に影響することが考えられる。その影響を調べるために A, B 相にそれぞれ一定の電流を流し、スライダ鉄心の X 方向の位置の変動をレーザー測長器（分解能 $0.1\mu\text{m}$ ）を用いて測定した。

(7・3) 実験結果および検討 バイアスコイル形とVR形のそれぞれにおいて適当なフィードバックゲインを定めたところ、安定な浮上と推進が確認された。VR形の実験結果の例として、図9に非接触推進案内時のギャップ変動値、コイル $A1, B1$ の起磁力を示す。 X 方向への移動速度が 6 mm/s 、ギャップ設定値が 0.4 mm のときに、ギャップ変動が $6\mu\text{m}$ ($p-p$) 以下であることが観察された。また、バイアス起磁力の変動成分が小さいため、正余弦波状のミニステップ波形がほとんど歪められておらず、 X 方向への滑らかな駆動が確認された。一方、(3)式の第2項をそれぞれ一定に保ったとき、位置決め安定点を中心とした X 方向の位置の変動は、 $0.1\mu\text{m}$ ($p-p$) 以下であった。脱調状態においては、ミニステップ駆動信号の周期と対応したギャップ変動が見られた。ただし、変動は数 μm 程度であることが確認された。なお、バイアスコイル形に関してもほぼ等しい性能が確認されている⁽¹⁾。以上の実験結果によって、二形式のリニアステップモータのいずれかによっても非接触の案内、推進、位置決めが可能であることが明らかにされ、また浮上制御と位置決めとの間の相互干渉が極めて小さいことが確認された。

8. 両形式の比較

前章までに、バイアスコイル形とVR形が等価回路のうえで互いに等価であることと、両形式が磁気吸引浮上実験においてほぼ等しい性能を示すことについて述べた。本章においては、両形式の比較を行う。表1に N 個のステップモータ要素の駆動に必要なアンプの数と両形式の利点、欠点を記す。

9. 今後の課題

(9・1) ステータコイル方式によるVR形リニア搬送装置の開発 図4に示したVR形ステップモータ

表 1 バイアスコイル形と VR 形の比較
Table 1. Comparison of the bias-coil type and the VR type.

バイアスコイル形要素 N 個	VR 形要素 N 個
ユニポーラアンプ N 個	ユニポーラアンプ $4N$ 個
バイポーラアンプ 2 個	ただし、 $0 < k < 0.5$ の場合
利点	利点
アンプの数が VR 形よりも少ない。 ただし、 A, B 相起磁力振幅を浮上制御のために変化させる場合はバイポーラアンプを $2N$ 個必要とする。	(i) ユニポーラアンプのみで駆動可能である。 (ii) 駆動アンプの前段で信号の加算減算を行うのでエネルギーのむだが少ない。 (iii) A, B 相起磁力振幅制御を上記のアンプ個数で実現できる。
欠点	欠点
(i) バイポーラアンプが必要。 (ii) 磁気回路内において各コイルの発生する起磁力が互いに打消し合う場合があり、エネルギーのむだがある。 (iii) スライド鉄心の構造がやや複雑である。	(iv) スライド鉄心の構造が比較的簡単であり、従来の VR ステップモータと同一である。 (v) 駆動コイルをステータ鉄心側に巻いたりニア搬送装置を実現し得る。
	バイアスコイル形との比較において、より多くのアンプを必要とする。ただし、バイアスコイルと A, B 相コイルを重ね巻することにより、バイアスコイル形と同数のアンプでの駆動が可能。

図 10 ステータコイル方式による VR 形ステップモータ

Fig. 10. Schematic of the stator-coil-VR type stepping motor.

タ要素は可動部であるスライド鉄心のコイルへの給電を必要とする。しかし、長距離の搬送や可動部への配線を避けなければならない場合などにおいては、図 10 に示したようなステータ鉄心の励磁コイルを巻く構造が好ましい。ただし、このステータコイル方式においては、スライド鉄心が X 方向への移動に磁極子を次々と乗移って浮上を続けなければならないため、吸引力発生に寄与する磁極子がスライド鉄心移動に伴って変化するという問題を伴う。この問題に対して VR 形は適切な構造をしている。その理由は、図 4 (b) の等価回路において、抵抗素子として表されている各ギャップが相互に並列接続になっており、その位

置が任意に交換可能であるという点である。スライド鉄心の長さを適当に定め、閉じた磁気回路が常に 4 個の磁極子を含むようにすれば、スライド鉄心に働く y 方向の吸引力の和は図 5 の場合とほぼ同様になると考えられる。今後、上記の基本構想に基づいて実験装置を作製し、実験を行う予定である。

〈9・2〉 完全非接触ロータリ形モータの作製と実験

本論文で報告した二自由度実験装置では、可動部への配線があり、他の自由度をボールベアリングで拘束している。そのため、磁気吸引浮上により固体摩擦を排除した利点を反映した厳密な位置決め精度測定ができない。今後、ロータが完全に非接触に支持されたロータリ形モータを作製し、オープンループ位置決め精度、繰返し位置決め精度、ロストモーション、クローズドループ位置決め精度、負荷の影響などを測定する予定である。

10. 結 言

磁気吸引浮上と駆動位置決めの機能を併せもつステップモータ要素の構造を二形式示し、それらが磁気的に等価であることを示した。また、等価回路に基づく吸引力の計算から、制御されたバイアス磁束に駆動位置決めのための正弦波状磁束を重ね合せるという励磁方法が磁気吸引浮上および位置決めに適することを明らかにした。更に、二形式のステップモータに関して磁気吸引浮上実験を試みた。実験で確認された事項を以下に列挙する。

- (1) 推力方向の位置 x を情報として用いない浮上制御回路を用いても、数 μm の浮上精度が得られることが確認された。
- (2) 駆動位置決めが磁気浮上に悪影響を及ぼさないこと、浮上のために各励磁コイルのバイアス電流を制御していることが位置決めに大きく影響しないことが確認された。

本論文において非接触案内および位置決め機能を有することが確認されたステップモータを要素として組合せたり、他の非接触支持機構と組合せることによって、完全に浮上した位置決め機構を実現することが可能となる。特に、磁気吸引浮上機構のみによるものは媒体を必要としないため、クリーンルームのみならず、真空や液体などの特殊環境でのアクチュエータ、位置決め案内機構としての利用が期待される。

実験装置の試作および研究上の数々の議論、協力に関して、著者らは日本精工 堀越敦、小森竜夫両氏に深く感謝いたします。

(平成元年 9 月 4 日受付、同 2 年 1 月 11 日再受付)

文 献

- (1) 樋口・水野・川勝・堀越：「磁気吸引浮上機能を有するリニアステップモータ」，電学論 D, 107, 50 (昭 62-1)
- (2) 穴山：エネルギー変換工学基礎論, p.65 (昭 52)
- (3) B. C. Kuo : Theory and application of step motors (1974)

樋 口 俊 郎 (正員)

昭和 25 年 2 月 26 日生。52 年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専門課程博士課程修了。同年同大学生産技術研究所講師，53 年同助教授，現在に至る。工学博士。メカトロニクス，生産システム，超精密位置決め，磁気軸受などの研究に

従事。60 年工作機械技術振興賞論文賞受賞。平成元年，2 年精密工学会賞受賞。精密工学会，計測自動制御学会，日本機械学会会員。

川 勝 英 樹 (正員)

昭和 36 年 5 月 27 日生。平成 2 年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専門課程博士課程修了。同年同大学生産技術研究所講師，現在に至る。工学博士。磁気浮上機構，アクチュエータ，STM，トンネル効果のメカトロニクス応用などの研究に従事。精密工学会会員。