

# 空心形永久磁石同期モータに基づくサーフェスモータの 駆動制御に関する研究

47-46202 上田 靖人

(指導教員 大崎 博之 教授)

Key Words: direct drive, two-dimensional drive, yawing motion, vector control

## 1. はじめに

駆動技術の基本となる直線駆動は、従来までボールねじなどの回転運動を直線運動に変換する機構と回転型モータを組み合わせて実現されていた。しかし、そのような直線駆動装置では、年々高まる高速性と高精度性の要求に対応ができていない。

また、駆動に要求される運動の自由度は直線だけにとどまらず、回転も含めた多自由度の運動にわたっている。従来、多自由度の駆動を行う際に1自由度の駆動を行うモータを複数組み合わせて行っていた。一般的にそのような駆動システムでは、装置全体が大型で複雑な構造になる傾向にある。

以上のような問題を解決するために、本研究では回転運動を直線運動に変換する機構を用いず、1つの界磁磁石で構成される可動子で2次元的な駆動ができるサーフェスモータの研究を行っている。これまでに、サーフェスモータとしての基本特性を数値解析と実験によって確認している。そこで、本研究では、それらの基本特性に基づきサーフェスモータの駆動制御系を設計して、数値解析と実験により駆動特性を把握して改善させることを目的とする。

## 2. サーフェスモータの基本構成

本研究で対象としているサーフェスモータを図1に示す。可動子には1つの二次元ハルバツハ磁石が、固定子には1つの2層のプリント基板で構成された空心で、 $x, y$ 方向に電機子導体がある。

ハルバツハ磁石とは、K. Halbach が提案した磁石配列であり、それにより片側に強力で正弦波状に分布した磁界が発生して、強力で脈動分の少ない推力が得られる。電機子導体は片面に3相、両面で計6相あり、それぞれが $x, y$ 方向の推力を発生させている。

ハルバツハ磁石が電機子に対して45度傾いている時、 $x, y$ 方向にピッチ $\tau$ の正弦波状の磁界が発生して、電機子のピッチ $\tau$ と一致するため、 $x, y$ 方向にリニア同期モータが構成され、同様の原理で駆動できる。

サーフェスモータの電磁力はハルバツハ磁石と電機子電流の位相差 $\theta_d$ と電機子電流の振幅 $I_0$ に依存す

る。電磁力は振幅 $I_0$ に比例して位相差 $\theta_d$ に対しては、図2に示す解析結果のように推力 $F_x$ とトルク $T_z$ は正弦波特性を示し、(1),(2)のように表せる。ここで、図2の示す解析結果は、 $x$ 方向の電機子のみ通電した結果である。 $K_F$ と $K_T$ は図3に示すように $z$ 軸まわりの回転角(ヨーイング角度) $\theta$ に依存する。図3より、 $\theta$ の増大が推力の減少を招くため、 $\theta$ を抑える必要がある。

$$F_x = K_F(\theta)I_0 \sin \theta_d \quad (1)$$

$$T_z = K_T(\theta)I_0 \cos \theta_d \quad (2)$$

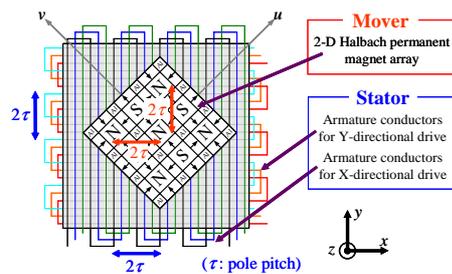
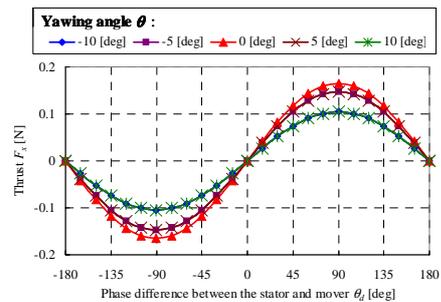
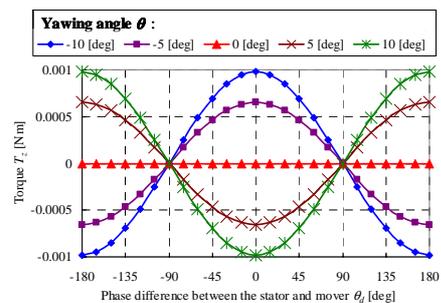


図1 サーフェスモータの基本構成



(a) 推力 $F_x$ - $\theta_d$  特性



(b) トルク $T_z$ - $\theta_d$  特性

図2 サーフェスモータの電磁力特性

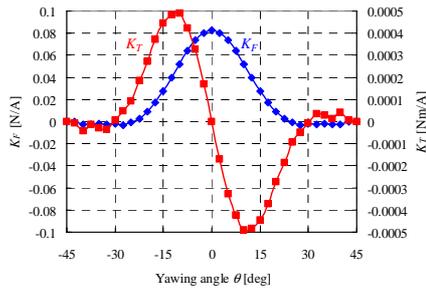


図3  $K_F$ と $K_T$ のヨーイング $\theta$ に対する特性

### 3. サーフェスマータの駆動実験

本研究でのサーフェスマータの駆動特性を測定するための実験装置の構成を図4に示す。可動子は摩擦を低減するためにベアリングによって支持され、固定子と対向している。2次元駆動する可動子の位置は3つのレーザ変位測定器によって測定される。その3つのセンサ信号はPCに取り込まれ、可動子の $x, y$ 方向の位置とヨーイング角度 $\theta$ が計算される。さらに、PCは可動子の位置情報と位置制御アルゴリズムに基づいて、 $x, y$ 方向の電機子導体、計6相分の電圧を出力する。それらの電圧信号は電力増幅器で増幅され、電機子導体に印加される。電機子電流と可動子の磁界が作用して電磁力が発生する。

図2より、電流振幅 $I_0$ が正で位相差 $\theta_d$ が $\pm 90$ 度の範囲内では、トルク $T_z$ が常にヨーイング角度 $\theta$ と逆方向に働く。そこで、 $\theta_d$ を $\pm 90$ 度の範囲内で(位相)制御することで、 $\theta$ を抑えながら $x, y$ 方向の推力 $F_x, F_y$ を制御できる。この推力制御には、次のPID制御を用いた。

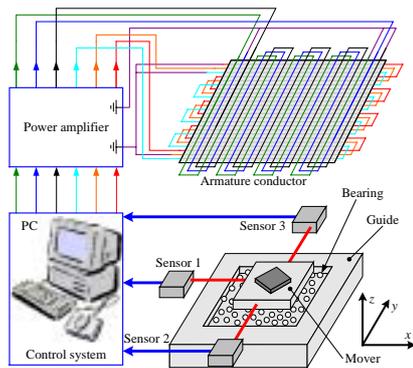
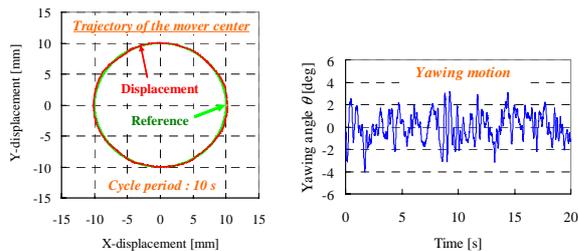


図4 実験系の構成



(a) 可動子の軌跡 (b) ヨーイング運動

図5 平面駆動の実験結果

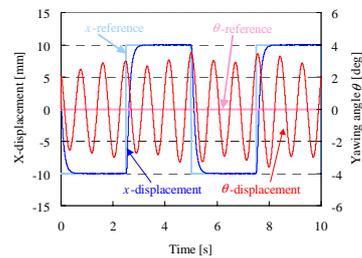
$$\theta_{dx} = \left( k_{px} + \frac{k_{ix}}{s} + k_{dx}s \right) (x_{ref} - x) \quad (3)$$

$$\theta_{dy} = \left( k_{py} + \frac{k_{iy}}{s} + k_{dy}s \right) (y_{ref} - y) \quad (4)$$

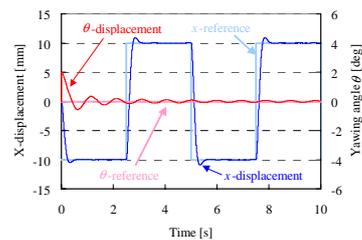
$\theta_{dx}, \theta_{dy}$ は $x, y$ 方向の位相差を、 $k_{px}, k_{ix}, k_{dx}, k_{py}, k_{iy}, k_{dy}$ は $x, y$ 方向のPIDゲインを表す。平面駆動の指令として半径10 mmの円を与えた時の実験結果を図5に示す。

### 4. ベクトル制御による駆動特性の検証

(1),(2)式より電流振幅 $I_0$ と位相差 $\theta_d$ を独立に制御(ベクトル制御)することにより、推力 $F_x$ とトルク $T_z$ を独立に制御できる。ここでは、 $x$ 方向の電機子のみ通電して、 $x$ 方向とヨーイング運動の特性を検証する。 $x$ 方向とヨーイング角度 $\theta$ を検出して、それらの指令値 $x_{ref}$ 及び $\theta_{ref}$ と比較して、それぞれPID制御器により $F_x$ と $T_z$ の指令値を決定する。また、図3と $\theta$ から $K_F$ と $K_T$ が決定されるので、3相の電流指令値が決定される。それらの電流指令値を満たすように電機子に電圧を加えれば、推力 $F_x$ とトルク $T_z$ を非干渉に制御できる。図6に位相制御とベクトル制御の解析結果を示す。ベクトル制御の導入により、同時に推力とトルクを能動的に制御でき、ヨーイング角度の制御性が位相制御と比べて改善した。



(a) 位相制御



(b) ベクトル制御

図6 ヨーイングを含む並進1自由度の駆動解析

### 5. まとめ

本研究では、サーフェスマータの制御系を設計して駆動特性の改善を図ることを目的とした。このサーフェスマータでは、ヨーイング運動が推力に影響を及ぼしてしまう。そこで、ヨーイング運動を抑制する制御を提案して、数値解析と実験により、それらの制御による駆動特性の改善を検証できた。