

## 永久磁石と予測制御を用いた磁気軸受開発のための組み込みシステムの検討

竹中智哉<sup>\*</sup>・佐藤辰雄<sup>\*</sup>・蛭原建一<sup>\*\*</sup>・松岡耕平<sup>\*\*</sup>・佐藤雅竜<sup>\*\*</sup>・岡田養二<sup>\*\*\*</sup>  
<sup>\*</sup>電子・情報担当・<sup>\*\*</sup>株式会社二豊鉄工所・<sup>\*\*\*</sup>財団法人大分県産業創造機構

### Examination of embedded system for magnet bearing with permanent magnet and predictive control development

Tomoya TAKENAKA<sup>\*</sup>・Tatsuo SATO<sup>\*</sup>・  
 Kenichi EBIHARA<sup>\*\*</sup>・Kohhei MATSUOKA<sup>\*\*</sup>・Masatatsu SATO<sup>\*\*</sup>・Yohji OKADA<sup>\*\*\*</sup>・  
<sup>\*</sup>Electronic Information Group・<sup>\*\*</sup>Niho Iron Works Co., Ltd.・  
<sup>\*\*\*</sup>Oita Prefectural Organization for Industry Creation

#### 要 旨

平成22年度から、次世代電磁力応用技術開発事業(大分県地域結集型研究開発プログラム)において、産業科学技術センターと(株)二豊鉄工所及び(財)大分県産業創造機構は、ハイブリッド型磁気軸受開発の共同研究を実施している。他の軸受と異なり制御を必要とする磁気軸受は、コントローラが高価で、実用化されている分野が限られている。そのため、安価なコントローラの開発が期待されている。本年度は、H8SX/1655マイコンを用いてコントローラを試作し、安価なコントローラを開発するための基盤技術を修得した。

#### 1. はじめに

磁気軸受は、磁力によってロータ(回転軸)を空中浮揚させ、非接触で支持する軸受である。そのため、摩擦・摩耗がなく潤滑剤が不要なため、他の軸受と比べ、メンテナンスが容易であることや高速回転が可能であるなどのメリットをもつ。さらに、永久磁石でバイアス磁束を与えるハイブリッド型磁気軸受(以後、ハイブリッド型)は、小さなエネルギーで駆動でき、発熱が小さく駆動回路の小型化が可能である。

しかし、磁気軸受は他の軸受と異なり、ロータを安定に支持するために制御を必要とし、センサやコントローラを用いるため高価(数百万円~)で、実用化されている分野が限られている。

そこで(株)二豊鉄工所は、安価なハイブリッド型の実用化を目指して、研究開発を始めた。本共同研究では、(株)二豊鉄工所が試作したハイブリッド型に適用できる安価(数十万円)なコントローラを開発を行う。本年度は、H8SX/1655マイコンを用いてコントローラを試作し、安価なコントローラを開発するための基盤技術を修得したので報告する。

#### 2. 制御対象の仕様

##### 2.1 制御対象(ハイブリッド型)の構造

制御対象として作製したハイブリッド型の側面図をFig.1に示す。ラジアル方向を支持する軸受2組により

横型設置で両端支持するものとし、アキシャル方向は両軸受の受動安定性に依存する。

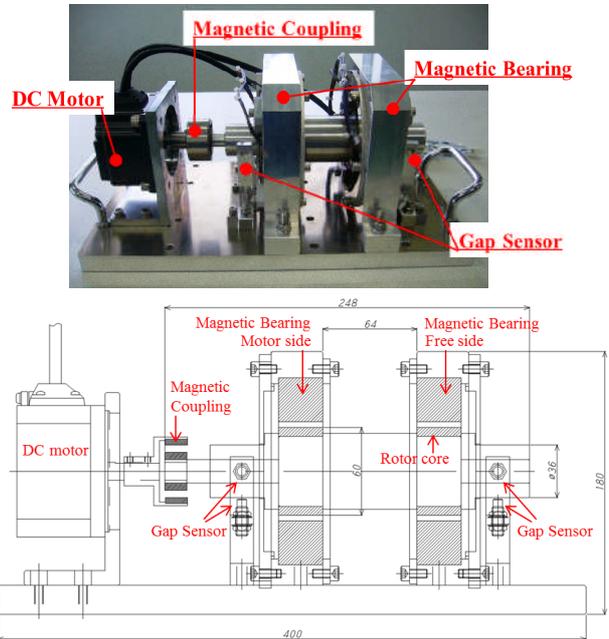


Fig.1 ハイブリッド型磁気軸受の側面図

軸受の構造と動作原理をFig.2に示す。制御コイルを有する主極(突極)を上下と左右に配置し、その間に永久磁石を挟む構造である。この永久磁石からバイアス磁束が発生し、上下の主極はN極に、左右の主極はS極に磁化される。Fig.2では例として上方向に力を発生させる

場合の軸受制御について説明する．上下の対向する巻線に図の向きに制御電流を流すことで，赤線で表される制御磁束が発生し，上側の極では磁束を強め合い，下側の極では磁束を弱め合う．これより上下突極部に磁気吸引力の差が生じ，ロータに上向きの力を発生させる．この電流制御をラジアル2方向に適用することで軸受制御を行う．

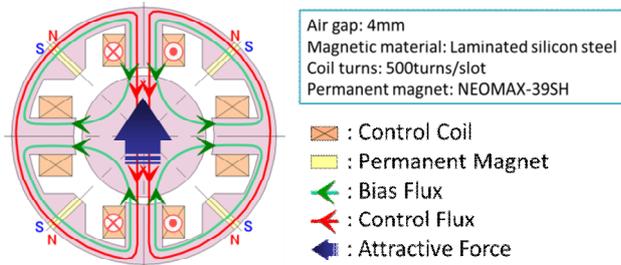
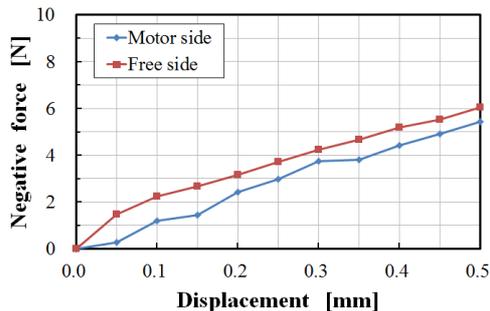


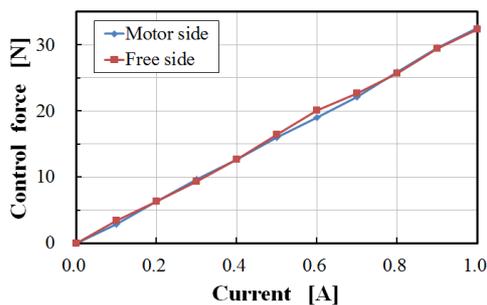
Fig.2 ハイブリッド型磁気軸受の構造と動作原理

### 2.2 静特性

x 方向の負バネ力と制御力の測定結果を Fig.3 に示す．y 方向も同様の結果となる．負バネ力に対して，浮上に十分な制御力が得られることがわかる．



(a) 変位に対する負バネ力 (x 方向)



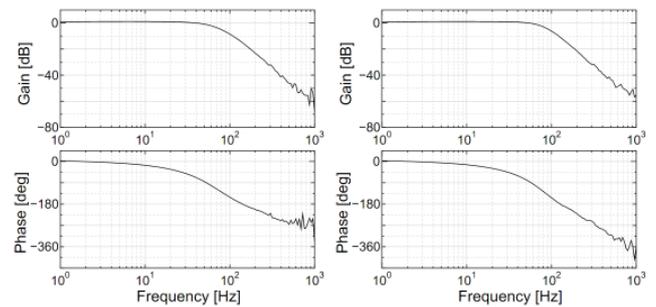
(b) 電流に対する制御力 (x 方向)

Fig.3 ハイブリッド型磁気軸受の静特性

### 2.3 周波数特性

茨城大学で測定された浮上制御のみを行った状態でのモータ側の周波数応答を Fig.4 に示す．浮上制御には4軸を個別にPID制御する局所PID方式を用いている．自由端側も同様の周波数応答となる．x, y 方向ともに

50Hz 付近に剛体モードが確認できる．



(a) y 方向 (b) x 方向

Fig.4 周波数応答 (モータ側のみ)

### 3. 駆動回路 (アクチュエータ) の開発

軸受の駆動回路として，リニアアンプとPWM アンプの2方式を作製した．

#### 3.1 リニアアンプ

リニアアンプの外観と構成を Fig.5 に示す．代表的な反転型電圧電流変換回路を用いており，入力電圧  $V_{in}$  と出力電流  $I_{out}$  は Fig.5 の関係式で表される．実際には発振を防止するために，位相補償回路を付加している．

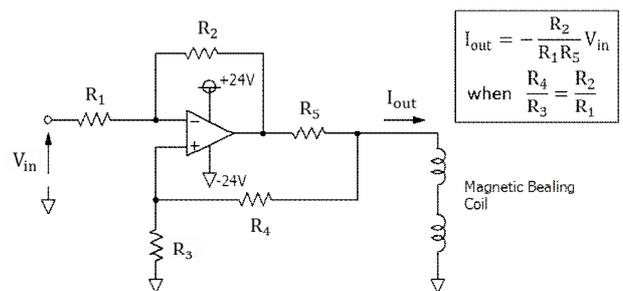


Fig.5 リニアアンプの外観と構成 (1 軸分)

#### 3.2 PWM アンプ

PWM アンプは，リニアアンプに比べ回路構成が複雑になるが低消費電力である．PWM アンプの外観と構成を Fig.6 に示す．N 型 MOSFET  $Tr1 \sim Tr4$  を用いて H ブリッジ回路を構成し，スイッチング動作をさせる． $Tr1$  と  $Tr4$  がオンすると Fig.6 の向きに  $I_{out}$  が流れる． $Tr2$  と  $Tr3$  がオンすると  $I_{out}$  は逆向きに流れる． $Tr1 \sim Tr4$  がオンする割合 (デューティ比) は， $I_{out}$  に比例するため，デューティ比を調整することで  $I_{out}$  を制御でき

る．Tr1～Tr4 をスイッチング動作させるためのゲート信号は，コントローラから供給される PWM 信号をもとに，デットタイム回路を介してゲートドライバ回路にて生成される．デットタイム回路では Tr1 と Tr2 または Tr3 と Tr4 が同時にオンして短絡事故を起こさないようにタイミング調整を行う．また，Iout をコントローラや外部機器で監視できるように，電流検出器にて Iout をアナログ電圧に変換し外部出力する．

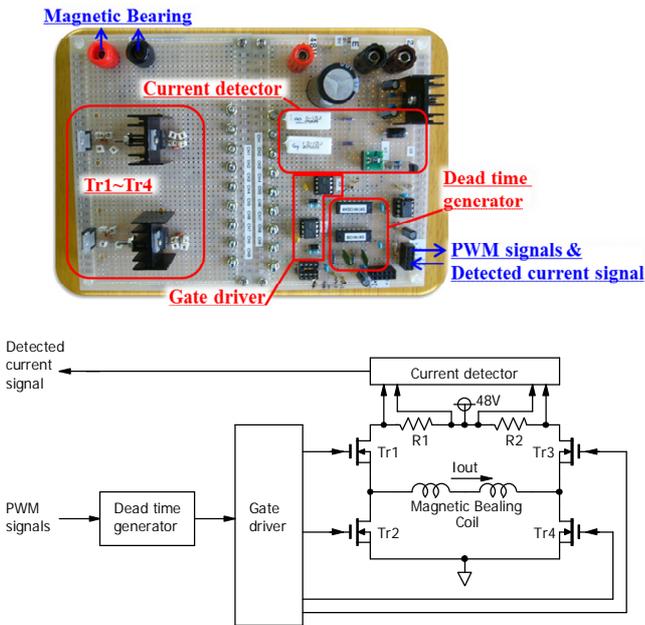


Fig.6 PWM アンプの外観と構成 ( 1 軸分 )

#### 4. コントローラの開発

##### 4.1 コントローラの仕様

Fig.4 の周波数応答や予備実験の結果から，サンプリング周波数を 4kHz とした．PWM 周波数は，騒音防止の観点から人間の可聴領域より高い 20kHz とした．AD 変換と DA 変換の分解能は 10bit 以上とし，PWM 信号の分解能は 12bit 以上とした．Fig.3 の静特性から，使用するデューティ比は最大 40%程度と想定される．デューティ比 40%までで 10bit 以上の分解能を実現するためには 12bit 以上の分解能が必要となる．これらの仕様を満たす低価格なマイコンとしてルネサス製 32bit CISC H8SX/1655 を選定した．H8SX/1655 はネット販売されており，約 4 千円で評価ボードを入手できる．H8 シリーズではハイエンド品であり，動作周波数は 48MHz で RAM は 40KB．動作周波数が 48MHz より低いマイコンを使用する場合には，FPGA などのハードウェアを併用し，処理速度を高める工夫が必要となる．

##### 4.2 コントローラの構成

作製したコントローラの外観と制御系の構成を Fig.7，Fig.8 に示す．マイコンを含めコントローラに使用した

部品は，ネット販売にて約 1 万円で入手可能である．変位センサとして，キーエンス製の渦電流センサ EX-502 を使用した．変位センサから出力される変位信号を，マイコンに入力可能な電圧レベルに変換後，エイリアシング除去のためサレン・キー型の 2 次 LPF を介してマイコンの ADC に入力する．変位信号をもとに，局所 PID 方式で制御演算を行い，駆動回路を駆動させ，軸受を安定的に目標の位置に浮上させる．スイッチ切り替えにより，2 方式の駆動回路に対応させた．H8SX/1655 は DAC を内蔵しているがチャンネル数が不足するため，SPI 通信が可能な DAC を外付けした．PWM アンプから出力される Iout を監視する信号は制御演算には使用していない．

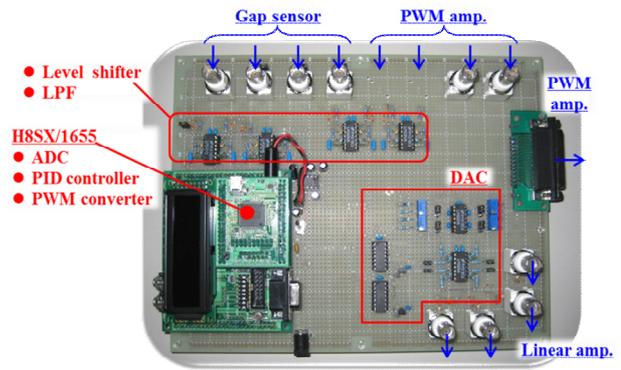


Fig.7 H8SX/1655 コントローラの外観

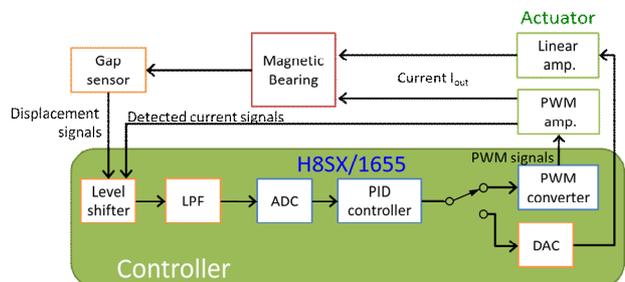


Fig.8 制御系の構成

##### 4.3 制御アルゴリズム

局所 PID 方式における制御演算は，下記の差分方程式に基づき行う．

$$\begin{aligned}
 x_i[k+1] &= x_i[k] + u[k] \\
 x_d[k+1] &= \frac{2T_d - T}{2T_d + T} x_d[k] + u[k] \\
 y[k] &= K_I T x_i[k] + K_D \frac{-4T}{(2T_d + T)^2} x_d[k] \\
 &\quad + (K_P + K_D \frac{2}{2T_d + T} + K_I \frac{T}{2}) u[k]
 \end{aligned}$$

$y[k]$ : 出力信号	$K_p$ : 比例ゲイン
$u[k]$ : 入力信号	$K_D$ : 微分ゲイン
$x_i[k]$ : 積分制御の状態量	$K_I$ : 積分ゲイン
$x_d[k]$ : 微分制御の状態量	$T$ : サンプルング周期
	$T_d$ : 微分時定数

この差分方程式は、連続系で設計したPIDコントローラを双一次変換して離散化している。双一次変換は、サンプルング周波数と制御系の応答周波数が十分に離れている場合に、連続系に近い周波数応答を期待できる離散化手法である。PIDコントローラは微分項に1次フィルタを挿入して近似微分を用いている。

## 5. 動作検証

制御対象の軸受とコントローラ、2方式のアクチュエータについて、個別に動作検証を行い、仕様通りの動作を確認した。現在(2012年3月22日)、これらを組み合わせる制御系を構築し、浮上回転試験を実施している。

## 6. まとめ

ラジアル方向4軸を支持するハイブリッド型を制御対象として、H8SX/1655マイコンを用いたコントローラおよび駆動回路を試作し、所望の軸受制御を実現した。駆動回路として、リニアアンプの他にPWMアンプを試作し、低消費電力化を図った。この試作を通して、安価なコントローラを開発するための基盤技術を修得した。具体的には、制御対象の静特性や周波数特性からコントローラ仕様を決定する方法や演算能力の低いマイコンで、効率よく演算処理する方法を修得した。