

学術論文

5軸制御永久磁石内蔵型ハイブリッド磁気軸受の開発

Development of Five Control Degree Internal PM Type Hybrid Magnetic Bearings

小柳 弘明^{*1} (学生員), 柿原 功一^{*1}, 岡田 養二^{*2} (正員)

Hiroaki KOYANGI (Stu. Mem.), Kouichi KAKIHARA, Yohji OKADA (Mem.)

Wide airgap and low cost magnetic bearing is widely requested. Traditional Hybrid (HB) type active magnetic bearing (AMB) has bias permanent magnet between the two radial magnetic bearings. This structure requires long magnetic circuit causing heavy structure and flux leakage. In order to solve this problem, a new internal permanent magnet (IPM) type hybrid magnetic bearing has been proposed which has compact magnetic circuit, small construction and low cost. In addition, a new sensing technique is proposed which uses Hall diode on the top of PMs. In this paper 5-D control scheme is proposed. The experimental setup is made and tested. The results obtained are discussed in detail.

Keywords: magnetic bearing, rotary machinery, digital control, electromagnetic actuator.

1 緒言

ケミカルキャンドポンプなどの分野で、ギャップが広く、かつ安価な磁気軸受の開発が切望されている。研究者らは、磁気回路を小さく形成できる永久磁石内蔵型磁気軸受を提案し、その基本動作を報告してきた[1-5]。これは、バイアス永久磁石をラジアル磁気軸受内部に持つため、磁気回路をコンパクトに形成でき、外部への漏れ磁束が少ないなどの多くの利点を持つ。このため、小さな永久磁石でも効果的に起磁力を得ることができる。また、センサコスト削減のため、ホール素子を永久磁石の先端に配置した新しい位置検出法を提案した。これを実用化できる大きさのギャップの広い5軸制御磁気軸受に適用し、浮上回転制御に成功したので報告する。

2 永久磁石内蔵型磁気軸受の構造

2.1 ラジアル磁気軸受の構造

Fig. 1 に提案するラジアル磁気軸受の構造を示す。巻線を持つ主極と永久磁石を先端に持つ補極とで構成された補極付4極構造となる。Fig. 1 左に示すように、軸受内部に二次元的なバイアス磁気回路を形成することができる。制御電流でFig. 1 右に示すように、主極の一方の磁束を強め、対向する磁束を弱めることで線形な軸受制御を行なう[1-5]。

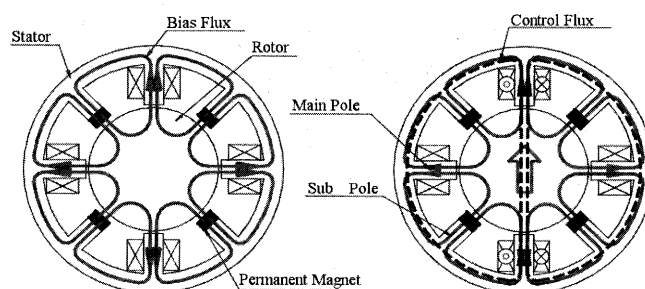


Fig. 1 Schematic of radial magnetic bearing.

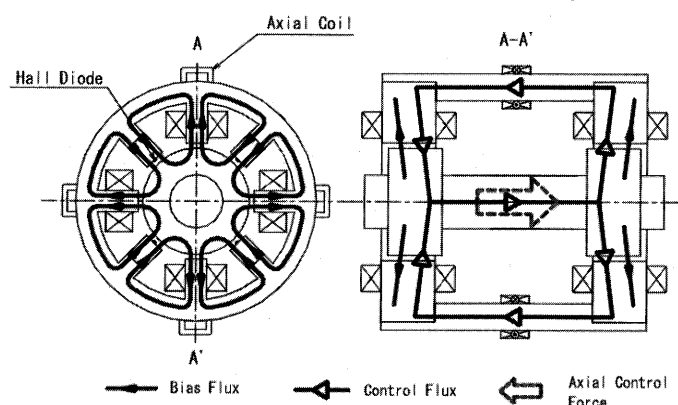


Fig. 2 Schematic of axial magnetic bearing.

2.2 アキシアル磁気軸受の構造

Fig. 2 に提案するアキシアル磁気軸受の構造を示す。提案する永久磁石内蔵型では、磁気回路をラジアル磁気軸受内部に二次元的に形成しているため、アキシアル方向力を発生しにくい構造になっている。これを

連絡先: 岡田 養二, 〒316-8511 日立市中成沢 4-12-1, 茨城大学工学部機械工学科, e-mail: y.okada@mx.ibaraki.ac.jp

^{*1} 茨城大学大学院 ^{*2} 茨城大学

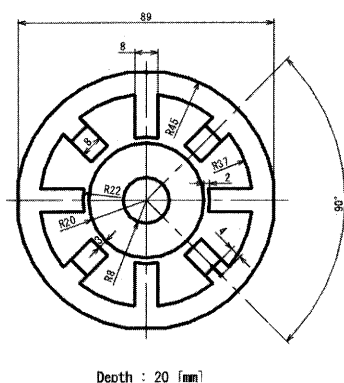


Fig.3 Schematic of radial analytical model.

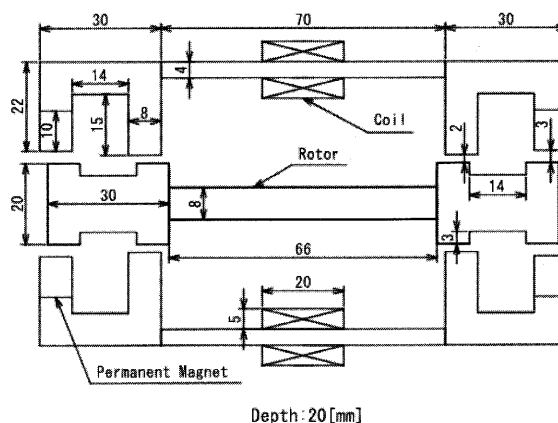


Fig.4 Schematic of axial analytical model.

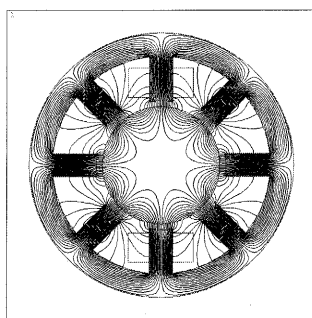


Fig.5 Flux lines (radial).

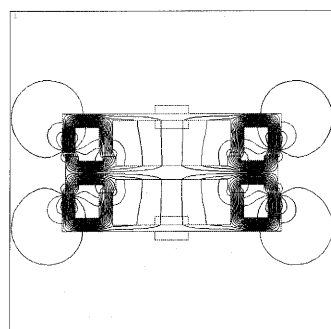


Fig.6 Flux lines (axial).

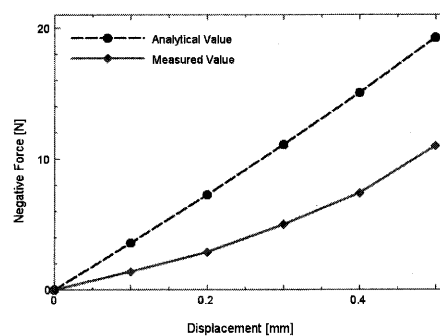


Fig.7 Negative force.

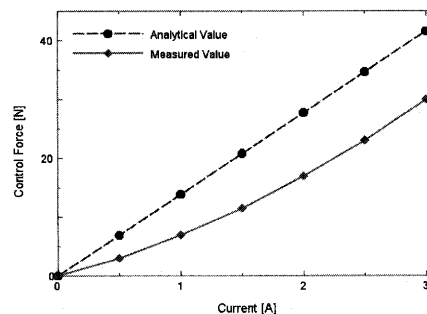


Fig.8 Control force.

解決するため、2 つのラジアル磁気軸受の間にアキシシャル制御コアを主極上にくるように4本設置する。アキシシャル制御コイルに電流を流すと、Fig. 2 の太い矢印のように、左右の主極のバイアス磁束を片方は強め、他方は弱めるように三次元的な磁気回路を形成させアキシシャル制御を行なう。アキシシャル方向力を発生させるため、ロータはラジアル磁気軸受に対して内側に2[mm]オフセットさせている。Fig. 2 右に示すように、アキシシャル制御電流によって右側のラジアル磁束を強め、左側のラジアル磁束を弱めることで、右向きのアキシシャル制御力を発生できる。

3 磁界解析による設計

提案する磁気軸受の形状を決定するため、解析ソフト ANSYS を用いた二次元磁場解析を行なった。解析に用いたラジアル、アキシャル磁気軸受を近似した二次元解析モデルを Fig. 3, 4 に示す。ラジアル磁気軸受は主極部のギャップ 2[mm]、補極部のギャップ 3[mm]とし、コイル巻数はラジアル主軸およびアキシャル軸 200 巻とも設計した。アキシャル磁気軸受は実際の装置の磁路断面積を考慮し、等価二次元モデルとして設計した。解析結果を Fig. 5, 6 に示す。それぞれの図よ

り良好に磁気回路を形成していることが確認できた。

ラジアル方向力の解析結果を Fig. 7, 8 に示す。破線が解析値、実線が後に述べる測定値である。解析結果より、推定される負ばね係数 $40[\text{kN/m}]$ 、力係数 $15[\text{N/A}]$ となり、線形で十分制御可能であると考えられる。

アキシャル方向力の解析結果を Fig. 9, 10 に示す。破線が解析値、実線が後に述べる測定値である。解析結果より、推定される復元力係数 $6[\text{kN/m}]$ 、力係数 $1.1[\text{N/A}]$ となり、十分制御可能であると考えられる。なお、ラジアルとアキシャル方向の干渉はほとんどなく、発生力が入力に比例している。

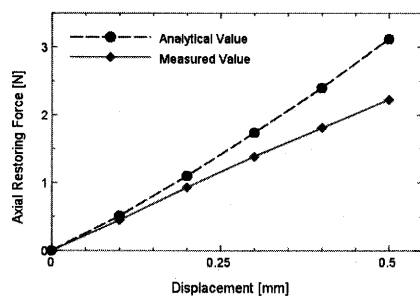


Fig.9 Axial restoring force.

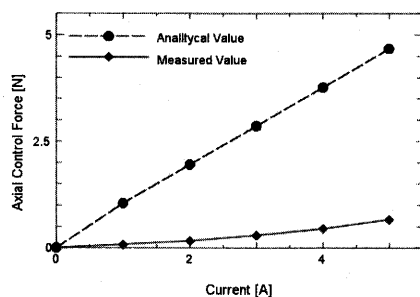


Fig.10 Axial control force.

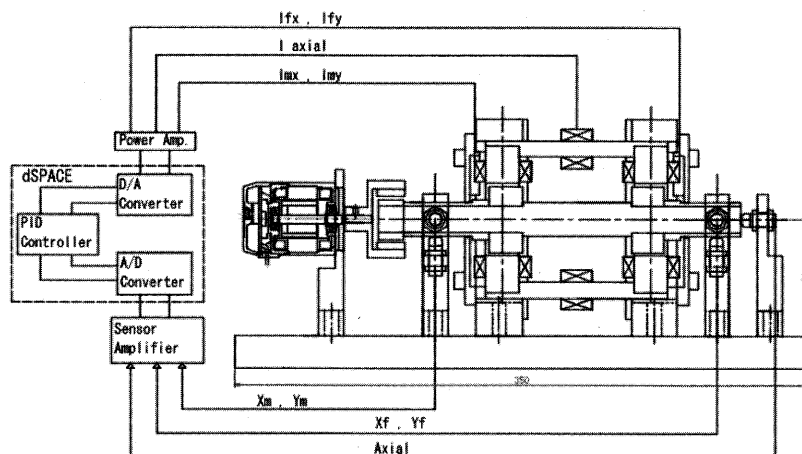


Fig. 11 Schematic of control system.

Table 1 PD control gains.

	Horizontal	Vertical
Kp [A/mm]	15	15
Ki [A/(s mm)]	0	0
Kd [A s/mm]	0.03	0.045

4 実験

4.1 実験装置と制御系の構成

解析結果をもとに装置の製作を行なった。装置と制御系の構成を Fig. 11 に示す。提案する磁気軸受をモータ側、自由端側にそれぞれ設置し、その間にアキシヤル制御コアを4本設置している。ロータの回転には磁気カップリングを用い、装置左端のACモータの回転を非接触でロータに伝達する。

制御は dSPACE (DS1104) を用いたデジタル PD 制御により軸受制御を行なう。渦電流センサ (KEYENCE EX-502, 感度: 2.5[V/mm]) からの変位情報を A/D コンバータを介して dSPACE に取り込む。この変位情報にローカル PD 制御を施し、D/A コンバータからパワーアンプ (PA12, 供給電圧: 24[V], 増幅率: 1[A/V]) へ出力する。これにより、各制御巻線に電流を流すことで、浮上制御を行う。また、モータの制御は、印加電圧を変化させることで回転制御を行なう。浮上実験に用いた PD コントローラゲインは実験的に Table 1 のように決定した。

4.2 静特性

製作した実験装置の静特性の測定結果を Fig. 7~10 に示す。ラジアル磁気軸受においては解析値の約 5~6 割程度と、磁極先端での磁束の広がりを考えれば妥当

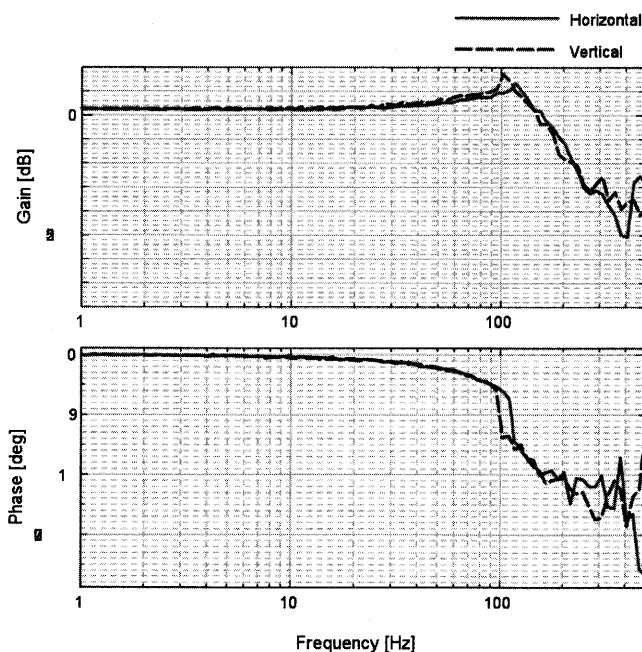


Fig.12 Frequency response in motor side.

で十分な力特性を得ることができたが、アキシヤル制御力においては解析値の約 1 割程度となり、動的な安定化を行うための十分な制御力を得ることができなかった。これは、ラジアル磁気軸受とアキシヤル制御コアの接合面における磁気抵抗の増加が原因と考えられる。今回は、アキシヤル方向は受動安定を利用し、ラジアル 4 自由度の制御のみで浮上実験を行った。

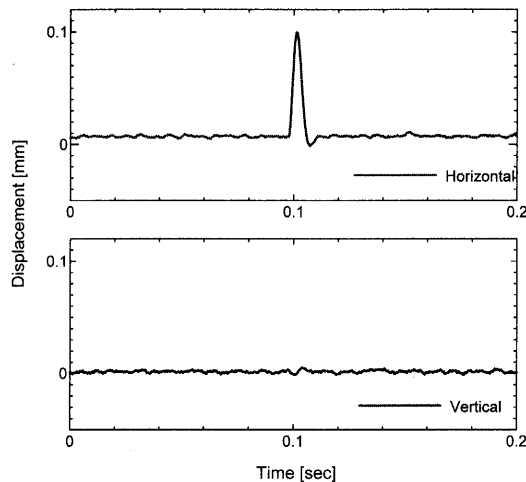


Fig.13 Impulse response in motor side.

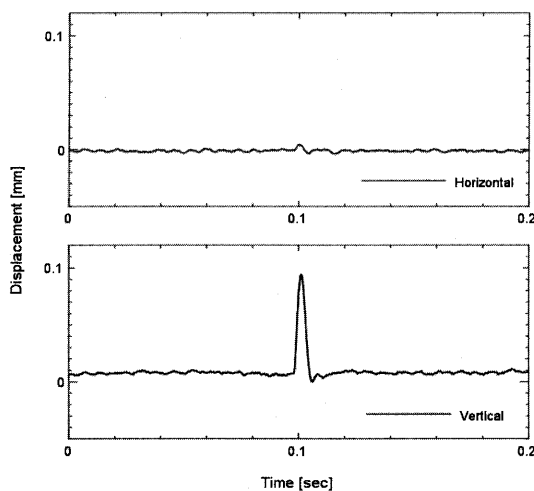


Fig.14 Impulse response in motor side.

4.3 浮上特性

まず、渦電流センサを用いた浮上実験を行った。安定浮上時における周波数応答の測定結果を Fig. 12 に示す。測定は、センサ信号に DSP 内部で正弦波を重畳させ、そのときの変位応答を測定した。測定結果より、約 100[Hz] 付近に約 7[dB] 程度のピークが存在するものの良く抑えられていることが確認できる。自由端側においてもほぼ同様な特性が得られた。

インパルス応答の測定結果を Fig. 13, 14 に示す。測定は、センサ信号に DSP 内部で幅 5ms で応答に 0.1mm のピークが得られる疑似インパルスを重ねさせ、そのときの変位応答を測定した。外乱を与えてから約 0.02[sec] で収束し、また、他方の軸への干渉も少なく良好な浮上制御を行なえていることが確認できた。

アンバランス応答の測定結果を Fig. 15~17 に示す。

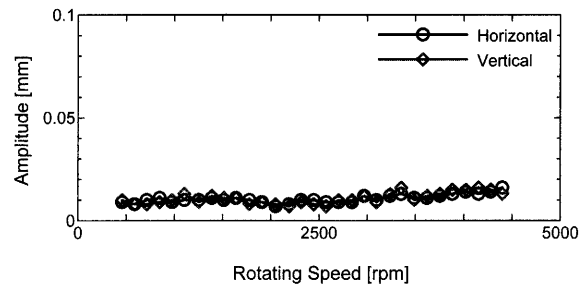


Fig. 15 Unbalance response in motor side.

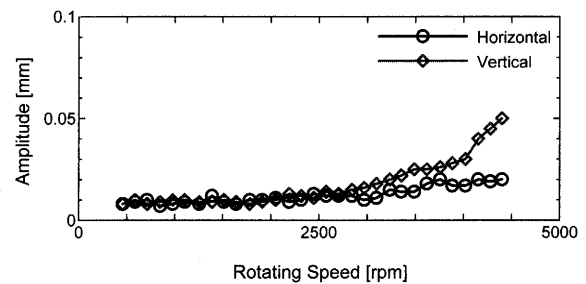


Fig. 16 Unbalance response in free side.

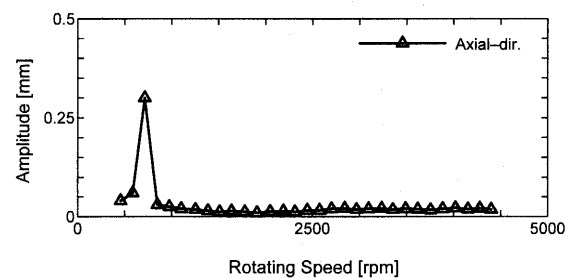


Fig. 17 Unbalance response of axial-direction.

測定は、浮上回転しているときの回転同期信号を FFT アナライザーで検出し、変位信号の P-P 値をプロットした。モータ側、自由端側において、最大振動振幅が約 0.05[mm] 程度となり最高回転数約 4500[rpm] まで安定した浮上回転が実現できた。アキシアル方向については受動支持の共振の影響より、約 700[rpm] 付近に約 0.3 [mm] 程度の共振ピークが存在するものの、それ以降では安定した浮上回転を行なえることが確認できた。回転限界は使用したモータの限界である。2000-3000[rpm] 回転で使用するキャンドポンプへの応用を考えているので、提案する永久磁石内蔵型磁気軸受の十分な浮上特性が確認できた。

5 ホール素子を用いた浮上回転実験

本論文では、安価で小さなホール素子を永久磁石の先端に配置した新しい位置検出法を提案する。これにより、大きな設置スペースを必要とせず、コロケート

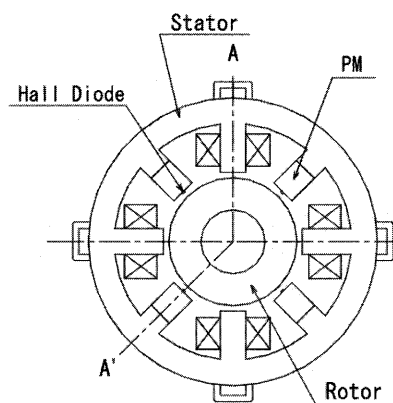


Fig. 18 Schematic of hall diode arrangement.

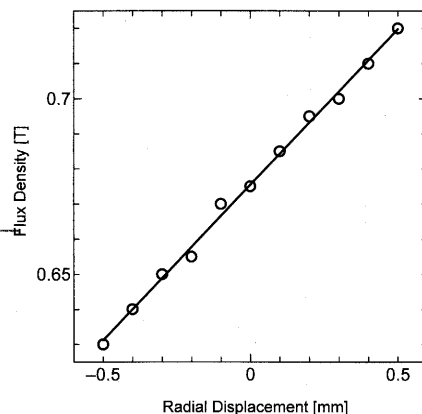
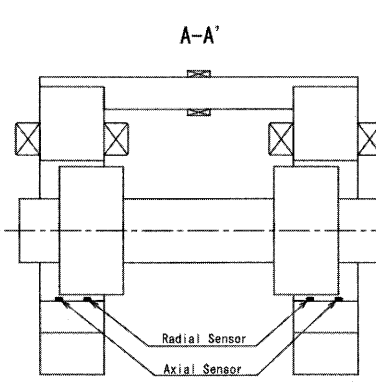


Fig. 19 Flux density characteristics on sub pole.

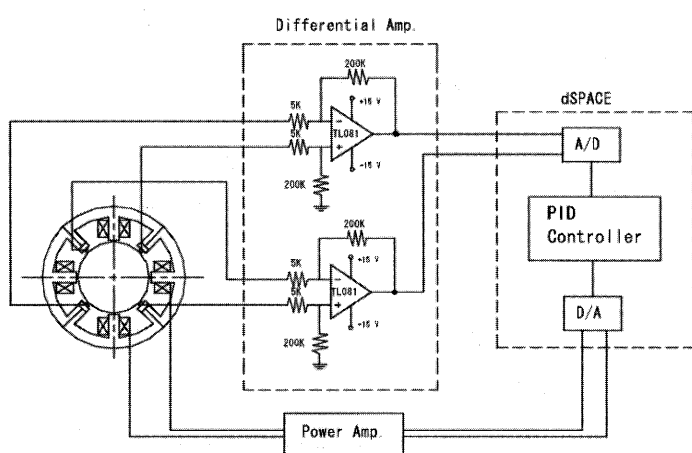


Fig. 20 Schematic of differential amplifier in radial-dir.

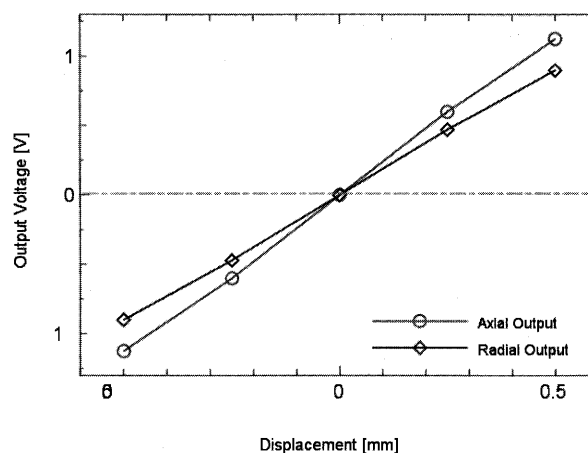


Fig. 22 Output characteristics.

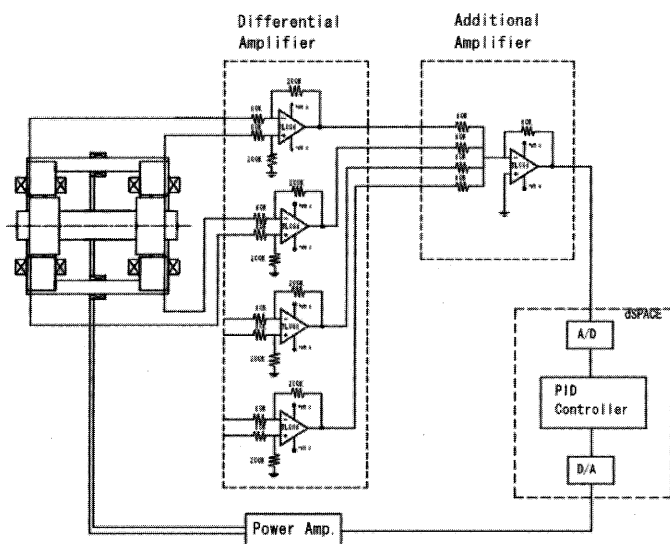


Fig. 21 Schematic of differential amplifier in axial-dir.

なセンサ配置が可能となる。

5.1 ホール素子による位置検出

Fig. 18 にホール素子の設置位置を示す。各補極の先端にラジアル用、アキシャル用のホール素子をそれぞれ 2 個ずつ計 16 個設置し、5 自由度の位置検出を行なう。Fig. 19 に、磁石の設置された補極上における磁束密度の変化特性を示す。補極部のエアギャップが 3[mm]と広いと、磁束密度はロータの変位に対してほぼ線形に変化しているが、その変化幅は小さい。位置検出感度の向上のため、差動増幅回路を用いたホール出力信号の増幅を行なった。ラジアル方向ではモータ側、自由端側それぞれに Fig. 20 に示す回路を用い、対向する磁石の先端に配置されたホール素子の出力の差をとり信号増幅を行なった。ここで、ホール素子の設置された補極は制御軸である主極に対して 45[deg]ずれているため、dSPACE 内で 45[deg] 方向の座標変換を行い制御軸上の変位とした。アキシャル方向では、Fig. 21 に示す回路を用い、左右に設置された軸受間

Table 2 PID control gains.

	Horizontal	Vertical
Kp [A/mm]	15	15
Ki [A/(s mm)]	5	5
Kd [A s/mm]	0.03	0.03

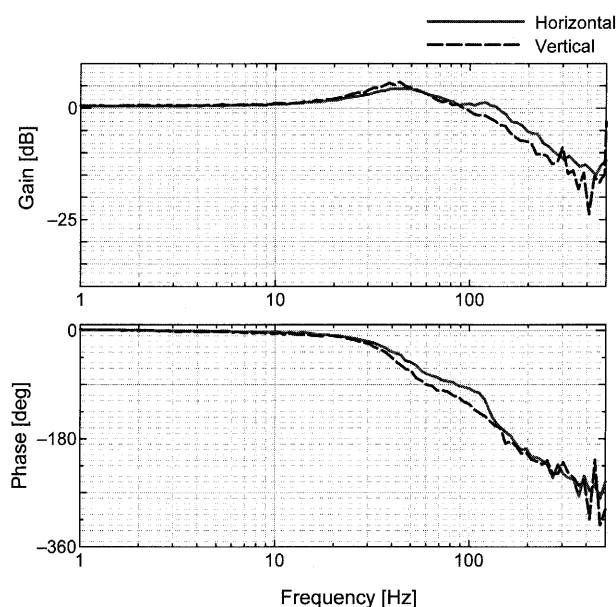


Fig.23 Frequency response in motor side.

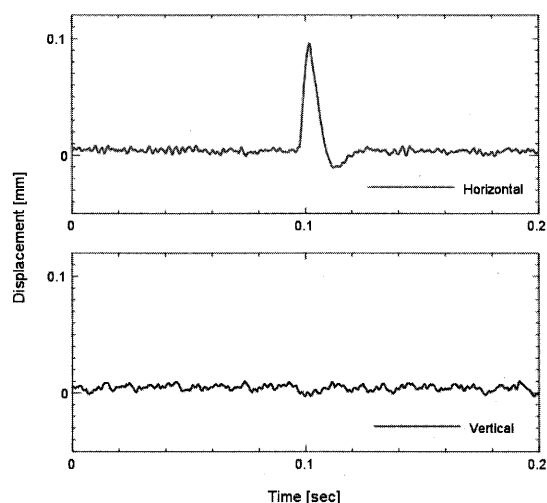


Fig.24 Impulse response in motor side.

に設置されたホール素子の出力の差をとり信号増幅を行い、加算した後に A/D コンバータに入力した。信号増幅を行なったラジアル、アキシャル方向のホール出力特性を Fig. 22 に示す。差動増幅回路を用いたことにより、両方向共にロータの変位 0.5[mm] に対して、

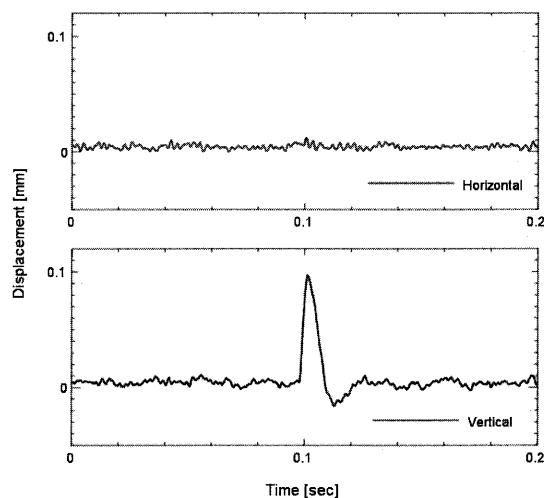


Fig.25 Impulse response in motor side.

約 1 [V] 程度の出力特性を得ることができた。これにより、良好な位置検出が可能であると考えられる。

5.2 制御系の構成

制御は前章と同様 dSPACE (DS1104) を用いたデジタル PID 制御により軸受制御を行なう。ホール素子からのロータの 5 自由度の変位情報を差動増幅回路を用いて信号増幅を行う。今回は定常偏差をゼロにするため、各変位情報にローカル PID 制御を施し、D/A コンバータからパワーアンプへ出力し、浮上制御を行なう。また、モータの回転は、印加電圧を変化させることで回転制御を行なった。浮上実験に用いた PID コントローラゲインは実験的に Table 2 のように決定した。

5.3 浮上実験

安定浮上時における周波数応答の測定結果を Fig. 23 に示す。測定の方法は、4.3 と同様である。測定結果より、各軸共に 45[Hz] 付近に約 5[dB] 程度のピークが存在するものの良く抑えられていることが確認できる。自由端側においてもほぼ同様な特性が得られた。しかし積分制御を入れたために、応答が少し遅くなっている。これは以下の実験でも確認できる。

インパルス応答の測定結果を Fig. 24, 25 に示す。測定結果より、定常状態においてノイズの影響が残るものの、外乱を与えてから約 0.02[sec] で収束し、また、他方の軸への干渉も少なく良好な浮上制御を行なえていることが確認できた。ホール素子を使う場合の問題は、このノイズをいかに減らすかである。

アンバランス応答の測定結果を Fig. 26～28 に示す。

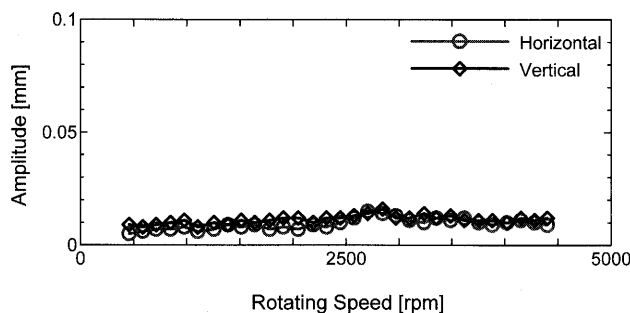


Fig. 26 Unbalance response in motor side.

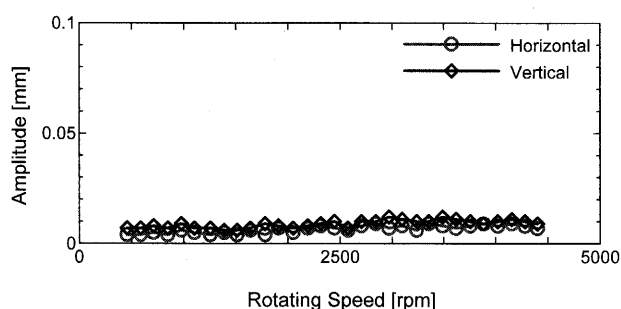


Fig. 27 Unbalance response in free side.

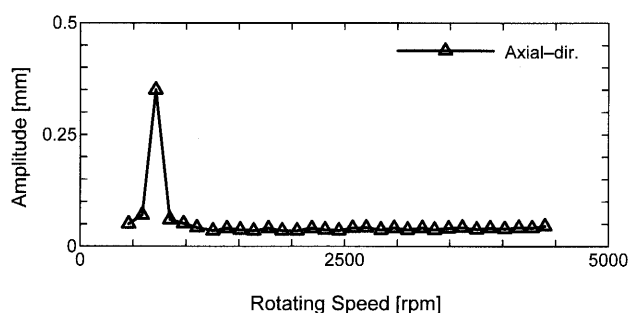


Fig. 28 Unbalance response of axial-direction.

測定結果より、モータ側、自由端側の各軸において、最大振動振幅が約 0.02[mm] となり最高回転数 4500[rpm] まで安定した浮上回転が実現できた。アキシヤル方向については受動支持の共振の影響により、700[rpm] 付近に約 0.35[mm] の共振ピークが存在するものの、それ以降では安定した浮上回転を行なえることが確認できた。これにより、ホール素子を永久磁石先端に配置した位置検出法の有用性が確認できた。

実験を通じて、コントローラも積分制御を入れたという違いはあるが、比例と微分はほぼ同じゲインで同じ様な特性が得られており、ホール素子検出の動的な問題やドリフトはほとんどなかった。問題はノイズの混入と、素子の信頼性（壊れることがある）である。

これを克服する使い方を行えば、実用上は全く問題ないことが確認できた。

6 結言

本論文では、5軸制御を目指した永久磁石内蔵型磁気軸受とホール素子を永久磁石の先端に配置した位置検出法を提案した。

製作した実験装置の静特性を確認した結果、2[mm] という広いギャップにも関わらず、ラジアル磁気軸受については十分な力特性を得ることができた。しかし、アキシヤル磁気軸受については十分な制御力を得ることができず、制御するには至らなかった。

渦電流変位センサを用いた浮上実験において、約 4500[rpm] までの安定した浮上回転が実現でき、良好な浮上制御を行えることを確認した。また、ホール素子を永久磁石の先端に配置したロータ位置検出において、定常浮上状態においてノイズの影響が少し残るものの、良好な浮上制御を行なえることを確認した。

今後は、アキシヤル磁気軸受の改良を行い、実際にキャンポンプへ適用して実用性能の検証を行なう予定である。

(2005 年 3 月 14 日受付, 2005 年 8 月 30 日再受付)

参考文献

- [1] 岡田, 小柳, 上野, 永久磁石内蔵型ハイブリッド磁気軸受の開発, MOVIC 2003 講演論文集, p.182, 2003.
- [2] 岡田, 小柳, 柿原, 永久磁石内蔵型教育用磁気軸受 Mirac Bearing-ED の開発, 第 13 回 MAGDA コンファレンス, p.303, 2004.
- [3] 上野, 荒井, 小田桐, 岡田, 3 極型永久磁石内蔵ハイブリッド磁気軸受の制御, 第 16 回電磁力関連ダイナミクスシンポジウム論文集, June 9-11, p.249, 2004, .
- [4] 岡田, 柿原, 小柳, 永久磁石内蔵 5 軸制御磁気軸受 Mirac Bearing-5D の開発, 電気学会リニアドライブ研究会資料, 2004 p.59
- [5] Yohji Okada, Hiroaki Koyanagi, Kouichi Kakihara, and Satoshi Ueno, MiracBearing : New Concept of Miracle Magnetic Bearings, Proc. of ISMB-9, 2004, CD-ROM