中空軸を持つ一軸浮上制御磁気軸受の提案と非接触回転駆動への応用

廣瀬 健太郎^a 小森 望充^{a,*} 浅海 賢一^a 坂井 伸朗^a

Proposal of One Axis Controlled Magnetic Bearing with a Hollow Shaft and its Application to No-Contact Rotation Drive

Kentaro Hirose^a, Mochimitsu Komori^{a,*}, Kennichi Asami^a, Nobuo Sakai^a

(Received January 28, 2015; revised March 2, 2015; accepted March 4, 2015)

Abstract

We propose a novel configuration of magnetic bearing for left ventricular assist device (LVAD) to realize simple and small LVAD. The magnetic bearing consists of a cylindrical stator with an inner ring and an outer ring and a rotor. The magnetic bearing and a displacement sensor have a hollow as a flow channel. In order to simplify the system, the magnetic bearing has the one axis controlled rotor in the axial direction. The displacement sensor coil in the axial direction is put in the center of stator. In this study, the displacement sensor is applied to the magnetic bearing and investigated. Magnetic field analysis was performed in order to evaluate magnetic flux of permanent magnet and force in the axial direction. Some experiments for levitation and rotation were performed.

キーワード：磁気軸受，一軸制御，永久磁石，中空軸

Keywords : magnetic bearing, one axis control, permanent magnet, a hollow shaft.

1. 緒言

1.1 背景

磁気軸受とは回転軸を磁気的な力により非接触で支持する軸受のことで、機械的な接触がある転がり軸受とは異なり、軸と軸受間に摩擦や摩耗がないため、高寿命かつメンテナンスフリーである。また、摩擦、摩耗がないため、潤滑を必要とせず、摩擦、摩耗で発生する塵埃や潤滑油蒸発が問題となるクリーンルームや真空中、生体内での使用が可能である。上記の利点から、磁気軸受は様々な分野への応用の研究、開発が行われており、その一つに人工心臓への適用が挙げられる⁽¹⁾。

人工心臓は完全置換型と補助型が研究、開発されている。また、人工心臓の駆動方法は拍動式と連続流式に大別され、連続流式には遠心ポンプと軸流ポンプ等が挙げられる。小型、高耐久でメンテナンスをあまり必要としない等の機能が人工心臓に求められ、更に省電力化のため能動型と受動型を組み合わせた磁気軸受を用いた軸流式が研究されている^(1,2)。

人工心臓に採用される磁気軸受には小型で安定して高速回転できる等の性能が求められる。そこで、小型で高効率な人工心臓を実現するために、先行研究では、2～3自由度を能動型と受動型を組み合わせた構造を採用している⁽²⁻⁷⁾。しかしながら、装置全体を小型化することに重きを置き、ステータを縮小すると浮上コイルの巻数が多くできず、コイルの線径を小さくすると必要な電流が流せないため、単位面積当たりで発生する力が小さくなってしまふ等の問題がある。また、2～3自由度を一組のステータで受動支持や能動制御する場合、ロータの扁平化や永久磁石の増設、各方向の制御のためのコイルを必要とするため、装置の大型化が避けられないと共に、装置の構造、システムを複雑にしてしまう問題がある。

1.2 目的

本研究では左心室補助型人工心臓への適用を目指した単純な装置構造の磁気軸受を提案する。提案する磁気軸受は軸流式ポンプを想定しているため、軸方向からロータを磁気支持する構造とする⁽⁸⁻¹⁰⁾。そこで本研究では、ロータを磁気支持するステータは、ロータの軸両端を挟み込み、軸方向の一軸のみを浮上制御する。また、ステータは装置の構造と制御系の簡単化のため、内環と外環を持つシリンダー状である。軸流式ポンプでは一般的に、

* Corresponding author. E-mail: komori_mk@yahoo.co.jp

^a 九州工業大学

〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1

Kyushu Institute of Technology

1-1, Sensui, Tobata, Kitakyushu, Fukuoka, Japan 804-8550

Fig. 1. Magnetic bearing configuration.

Fig. 2. Method of levitation control.

ロータの側面にインペラがあるため側面に流路を持つが、本研究ではロータの中心部に流路を持つ中空軸構造を採用する^(11,12)。ロータの中心部に中空軸を持たせることによって、ロータとケーシングとの間にワイドギャップを必要とせず、半径方向の大きさを小さくすることを図る。また、この構造を実現するため、ロータの中央部の流路と同径の穴を持つセンサコイル及びステータを用いる。本研究では提案した磁気軸受を実際に作製し、回転時の動特性の評価、検討を行う。

2. 基本的な構成

2.1 磁気軸受の基本構成

Fig. 1 は、提案するロータ中心部に流路を想定した中空軸を持つ軸浮上制御軸受の簡略モデルである。ロータ、ステータは共に電磁軟鉄で出来ている。また、ロー

Fig. 3. Detecting circuit of displacement sensor.

Fig. 4. Experimental setup for displacement sensor.

Fig. 5. Output of displacement sensor vs. displacement between coil and sensor target.

タとステータは共に外直径が 42.5mm である。ロータはロータの軸両端に位置するシリンダー状のステータによってプッシュアップ的に浮上制御される。磁気軸受の全体の制御システムと下側のロータに働く力を Fig. 2 に示す。Fig. 2 は Fig. 1 の下側のステータとそれと対向するロータの鉄部分を拡大したものである。本研究では浮上制御に必要な電力の省電力化と浮上用コイルのスペースの縮小化のため、リング状の永久磁石をステータの内環部に

(a) Stator with 8-pole coils and rotor with rubber magnets.

(b) Excitation pattern.

Fig. 6. Configuration of motor.

設計、バイアス磁束を得ることを図った。永久磁石の外直径 30mm、内直径 23mm、磁化方向厚さ 3.0mm、表面磁束密度 322mT である。ロータ、ステータ間のエアギャップは上下共に 0.75mm である。各浮上用コイルは線直径 0.5mm、266 巻であり、ステータの内環と外環の間に納められている。上下の浮上用コイルには、制御コントローラからの信号を正負反転して(上側が正のままなら、下側は負に変換)入力する。電磁石が発生させる磁束の向きを切り替えることで永久磁石のバイアス磁束と合わせてロータに働く吸引力を発生させ、上側も同様に制御を行うことによって、ロータを目標位置に安定浮上させる。

2.2 変位センサの原理と特性

提案する一軸浮上制御磁気軸受システムを構成するにあたり、流路となる中空軸を持つ変位センサの検出回路を Fig. 3 に示す。変位センサは、センサターゲットと各センサコイル間のギャップによる相互インダクタンスから各出力電圧を得て、センサコイル 1 とセンサコイル 2 の電圧差を得ることによって、ギャップを求める。また、使用温度範囲が広いことと、回路がブリッジ構成の

Number of elements : 32,704
Number of nodes : 7,340

Fig. 7. Analysis model.

ため安定度が高いという利点があり、消費電流は 30mA 以下と非常に小さい。Fig. 4 に変位センサの本磁気軸受への有用性を確認するための実験方法の概略図を示す。変位センサの二つのコイル (Sensor coil1, Sensor coil2) と変位センサと同直径 8mm の中空軸を持つセンサターゲットとのエアギャップを上下それぞれ 0.75mm に配置する。x, y 軸は半径方向を、z 軸は軸方向を示している。Fig. 5 は 0 位置から z 軸方向上下にセンサターゲットを変位させた際の出力電圧を示しており、使用範囲において出力に線形性が見られるため、本研究での使用において十分な性能が得られることがわかった。したがって、この変位センサからの信号を制御コントローラに入力し、PD 制御を行うことでロータの安定浮上を図る。

2.3 モータの構成

一軸浮上制御磁気軸受において基礎的な浮上回転実験を行うため、ロータ側の片側 4 極のゴム磁石と、ステータ側の片側 8 スロットの空芯コイルからモータを構成した。基礎的な浮上確認を行うため、ロータには加工が比較的容易な点から、磁化方向厚さ 3.0mm のゴム磁石を用いた。空芯コイルは線直径 0.3mm で各 128 巻である。ゴム磁石と空芯コイルの配置を Fig. 6 (a)に、コイルへの励磁パターンの一例を Fig. 6 (b)に示す。ゴム磁石とコイルは向き合うように配置されている。ゴム磁石とコイルが向き合う際はコイルに電流は流れず、ゴム磁石がコイル間に位置した時を Fig. 6 (b)に示すようにコイルの極を切り替えることで 22.5° ずつ回転させる。

3. 磁気軸受の有限要素解析と浮上性能評価

3.1 有限要素解析

本研究で提案する中空軸を持つ一軸浮上制御磁気軸受の吸引力特性の解析を行った。下側のステータと対面するロータ部分の解析モデルを Fig. 7 に示す。要素数は 32,704、節点数は 7,340 である。Fig. 7 の解析モデルを基

(a) Bias flux line.

(b) Attractive force in the axial direction vs. current.

Fig. 8. Magnetic flux lines and attractive force (Result of analysis).

に、浮上用コイルに流れる電流が 0A の際のロータ及びステータを通る磁束線と浮上用コイルに流れる電流を変化させた時のロータに働く吸引力を Fig. 8 に示す。Fig. 8 (a)より、磁束線が内環から外環にかけて所望の通りに閉じていることがわかる。Fig. 8 (b)より、浮上用コイルに流れる電流を変化させた時、発生する吸引力に線形性が見られる。

3.2 磁気軸受の吸引力評価

提案した磁気軸受の吸引力を確認するため、実際に作製したロータ及びステータを用いて、解析同様、浮上用コイルに流れる電流を変化させた時、発生する吸引力について測定を行った。その結果を Fig. 9 に示す。Fig. 9 の吸引力は解析結果 Fig. 8 (b)と比べて僅かに小さいが、いずれも発生する吸引力に線形性が見られた。

4. 中空軸を持つロータの浮上及び回転実験

4.1 浮上性能評価

提案した磁気軸受の浮上性能を確認するため、実際に作製した磁気軸受を用いて、浮上時のゲインの測定、インパルス応答実験、ステップ応答実験を行った。軸方向

Fig. 9. Attractive force in the axial direction vs. current (Result of experiment).

Fig. 10. Impulse response.

Fig. 11. Step response.

制御のための制御ゲインは試行錯誤的に決定し、比例ゲインは 3.14A/mm、微分ゲインは 0.13As/mm とした。

ロータを軸方向の一軸のみで浮上制御した状態で、浮上用コイルに外乱として擬似的なインパルス力を電氣的に印加した場合のインパルス応答を測定した。実験ではロータ、ステータ間のエアギャップの 1/3 程度の振幅になる様にインパルス力を与えた。その結果を Fig. 10 に示す。実験結果から、インパルス応答の振幅は約 0.25mm、静定時間は約 0.05s となっていることがわかる。エアギャップの 1/3 程度の振幅を持つインパルス力を与えたにも拘らず、良好な即応性を確認することができた。

同様に、ロータを軸方向の一軸のみで浮上制御した状態で、浮上用コイルに振幅が 0.10mm となる様なステッ

Fig. 12. Experimental setup.

ブ状の外乱を電氣的に印加した。そのステップ応答を Fig. 11 に示す。実験結果から、ステップ応答の振幅は約 0.10mm, 静定時間は約 0.01s となっていることがわかる。定常位置から約 0.10mm 変位するようなステップ状の外乱を印加した時、良好な即応性と変位後も良好な浮上制御を実現することができた。

4.2 回転実験

Fig. 6 (a) の 8 スロットモータを用いて、Fig. 12 に示す実験装置を構成した。浮上回転実験の結果を Fig. 13 に示す。軸方向変位はステータ中央に納められた変位センサを、半径方向変位はレーザ変位計を、回転数は光学式の非接触型タコメータを使用して測定した。回転駆動用の空芯コイルにはそれぞれ 0.6A の励磁電流を流した。

Fig. 13 (a) は浮上回転時の時間に対する回転速度を示しており、次第に回転速度が増加し、最大 350rpm で回転していることがわかる。Fig. 13 (b) は時間に対する軸方向変位を示しており、ロータの回転速度が次第に増加しても、軸方向の変位が 0.2mm 以下と小さいことがわかる。また、浮上用コイルに流れる電流は約 0.2A と小さかった。しかし、一組のステータを用いてプッシュプル方式で PD 制御を行ったが、両方のステータの特性が正確に等しくないため、ロータが目標点 0 から少しずれた位置で釣り合っていることがわかる⁽¹³⁾。Fig. 13 (c) は時間に対する半径方向変位を示しており、Fig. 13 (b) の軸方向変位と比べて、半径方向の変位が大きいことがわかる。これは半径方向の変位に対して能動的な制御や受動支持装置を設けておらず、各浮上用ステータの軸方向制御によって得られる半径方向吸引力のみによって半径方向の変位を受動支持しているためである。また、70s 以降の振幅が増大しているのは、磁気軸受による受動支持が十分でないためだと考えられる。

(a) Rotational speed.

(b) Displacement in the axial direction.

(c) Displacement in the radial direction.

Fig. 13. Result of stable levitation and rotation.

5. 結言

左心室補助型人工心臓への適用を想定し、ロータの軸両端を永久磁石と電磁石から成るシリンダー状のステータで挟み込み、一軸のみを浮上制御する磁気軸受の構造を提案した。また、提案した磁気軸受は流路を想定した中空軸を持っている。提案した磁気軸受に用いる同直径の中空軸を持つ変位センサに関して出力特性の測定を行い、その有用性を確認した。提案した磁気軸受の磁場解析モデルと実際に作製した磁気軸受とで発生する吸引力の比較を行った。その結果、僅かに違いがあるものの、

所望の結果を得られた。また、実際に作製した磁気軸受と一つの変位センサを用いた浮上システムにおいて外乱への応答試験を行い、良好な即応性と浮上制御特性を確認した。片側4極のゴム磁石と片側8スロットの空芯コイルを用いて回転実験を行い、最高350rpmで回転することを確認した。

今後は半径方向変位と傾きに対する制御方法の検討とロータの中空軸にインペラを取り付けて、揚程実験等を行っていききたい。

文 献

- (1) 電気学会磁気浮上応用技術調査専門委員会：「磁気浮上と磁気軸受」，コロナ社，1998.
- (2) 栗田伸幸，石川赴夫，手塚孝幸，高田敬夢：「5自由度能動制御型磁気浮上モータに関する研究」，日本機械学会論文集C編，Vol. 79，No. 801，pp. 236-249，2013.
- (3) 山城直人，岡田養二：「コンシークエント型アキシアルセルフベアリングモータの開発と応用」，日本AEM学会誌，Vol. 14，No. 1，pp. 2-7，2006.
- (4) 湯本淳史，進士忠彦，張曉友，下河辺明：「小型遠心血液ポンプ用1自由度制御型磁気浮上モータ」，第20回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム論文集，pp. 129-132，2008.
- (5) 黒須寛秋，増澤徹，加藤綾子，小沼弘幸，柿原功一：「4軸制御型磁気軸受を用いた磁気浮上クリーンポンプの研究開発」，日本AEM学会誌，Vol. 17，No. 2，pp. 309-316，2009.
- (6) 山根隆志：「人工心臓の技術開発」，ながれ，Vol. 20，No. 6，pp. 435-438，2001.
- (7) Sung Hoon Kim, Shuichiro Hashi, and Kazushi Ishiyama: "Actuation of Novel Blood Pump by Direct Application of Rotating Magnetic Field", IEEE transactions on Magnetics, Vol. 48, No. 5, pp. 1869-1874, 2012.
- (8) Yohji Okada, Toru Masuzawa, Ken-Ichi Matsuda, Kunihiro Ohmori, Takashi Yamane, Yoshiaki Konishi, Shinya Fukahori, Satoshi Ueno, and Seung-Jong Kim: "Axial Type Self-Bearing Motor for Axial Flow Blood Pump", Artificial Organs, Vol. 27, No. 10, pp. 887-891, 2003.
- (9) S. Neethu, K. S. Shinoy, and A. S. Shajilal: "Novel Design, Optimization and Realization of Axial Flux Motor for Implantable Blood Pump", International Conference on Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth, pp.1-6, 2010.
- (10) 湯本淳史，進士忠彦：「軸方向制御型磁気軸受モータを搭載した小型血液ポンプ」，日本機械学会論文集C編，Vol. 78，No. 792，pp. 3064-3072，2012.
- (11) Sheng-Ming Yang and Ming-Shi Huang: "Design and Implementation of a Magnetically Levitated Single-Axis Controlled Axial Blood Pump", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 6, pp. 2213-2219, 2009.
- (12) 住倉博仁，福長一義，舟久保昭夫，福井康裕：「軸流血液ポンプ用

エンクローズインペラの提案とCFDを用いた工学的検証」，ライフサポート，Vol. 20，No. 1，pp. 9-16，2008.

- (13) 田鍾業，ハネス・プロイレル，樋口俊郎：「磁気浮上システムのオートチューニングレギュレータ」，東京大学生産技術研究所生産研究，Vol. 46，No. 12，pp. 690-693，1994.
- (14) 大石哲男，志村誠治，岡田養二：「同期型および誘導型磁気浮上回転モータの研究」，電気学会論文誌，Vol. 115，No. 3，pp. 342-347，1995.
- (15) 上野哲，金箱秀樹，山根隆志，岡田養二：「永久磁石反発を用いた1軸制御アキシアル磁気浮上モータの浮上回転実験」，日本AEM学会誌，Vol. 8，No. 2，pp. 239-245，2000.

廣瀬 健太郎

2010年3月九州工業大学工学部電気工学科卒業。同年4月九州工業大学工学大学院府先端機能システム工学専攻入学，現在に至る。磁気軸受の研究に従事。

小森 望充

1984年3月大阪大学基礎工学研究科制御工学分野修了。2008年4月九州工業大学大学院工学研究科先端機能システム工学研究系教授，現在に至る。磁気浮上及び超電導応用メカトロニクスの研究に従事。

浅海 賢一

1992年3月九州工業大学情報工学研究科情報科学卒業。2008年4月九州工業大学大学院工学研究科基礎科学研究系准教授，現在に至る。ビジュアルトラッキングシステムにおけるリアルタイムモーター制御の研究に従事。

坂井 伸朗

2002年3月九州大学工学研究科知能機械システム専攻修了。2011年1月九州工業大学大学院工学研究科先端機能システム工学研究系准教授，現在に至る。生体機能設計学（バイオニックデザイン）の研究に従事。