小児用人工心臓のための小型 5 軸制御セルフベアリングモータ

5-DOF Control Miniaturized Self-bearing Motor for Paediatric Ventricular Assist Device

長 真啓^{*1}(学生員), 増澤 徹^{*2}(正員), 大森 直樹^{*1}, 巽 英介^{*3}

Masahiro OSA (Stu. Mem.), Toru MASUZAWA (Mem.), Naoki OMORI, Eisuke TATSUMI

A novel 5-degrees of freedom (DOF) controlled magnetically levitated motor has been developed for paediatric ventricular assist device (VAD). The motor has a top stator, a bottom stator and a levitated rotor which is sandwiched by the both stators. A double self-bearing motor mechanism enhances a higher rotating torque production and realizes a 5-DOF active control of rotor postures. This paper investigated a magnetic suspension ability and rotation ability of two motors which are made of soft magnetic iron and powder magnetic core. The developed motor is 28 mm in diameter and 41 mm in height. The maximum energy efficiency is sufficiently increased from 46 % to 72 % by using the powder magnetic core motor, although the magnetic axial attractive forces are only slightly reduced by 10 % of the soft magnetic iron motor. The powder magnetic core motor has sufficient performance as an actuator of the paediatric VAD.

Keywords: 5-DOF, double self-bearing motor, paediatric, ventricular assist device.

1 緒言

機械的循環補助は心不全患者の増加とドナー不足の観点から心臓移植あるいは心機能回復への橋渡しとして成人患者に実践的に使用されている。小児患者の救命においても補助人工心臓の適用は有効であるが、解剖学的な制限から既存の補助人工心臓は 10 歳以上の小児にのみに埋め込まれているのが現状である。このため、小さな小児に適用可能な補助人工心臓の開発が望まれる[1-4]。小児用補助人工心臓には、①年オーダーの機械的寿命を持つこと、②血球破壊や血栓形成が少ないこと、③体内へ埋め込むため小型であることが要求される。機械的接触部分を持たない磁気浮上型人工心臓は、高い機械的耐久性と血液適合性を得られるため注目を浴びている[5-9]。近年では、ロータ姿勢の 1 から 3 自由度を能動制御する磁気軸受とモータ両方の機能を併せ持つセルフベアリングモータが開発され[10-14]磁気浮上モータの小型化が実現されている。本研究では、小児用人工心臓への適用を目的とした小型な 5 軸制御アキシアルギャップセルフベアリングモータを新規に開発している。本稿では、ステータコア材料が電磁軟鉄および圧粉磁心の磁気浮上モータを制作し、磁気支持、回転性能評価を行ったので報告する。

2 方法

2.1 5 軸制御セルフベアリングモータの構造

提案する 5 軸制御磁気浮上モータは永久磁石アキシアルギャップモータを用いたダブルステータ構造であるため高いトルクを得ることができる。Fig. 1 に 5 軸制御磁気浮上モータの概要を示す。本モータは、同一構造を有する 12 突極の上部ステータ、下部ステータにより浮上ロータを軸方向上下から挟み込む構造を採る。浮上ロータの軸方向両表面にはモータステータと向かい合うように軸方向に着磁された 8 極の回転用永久磁石が配置されている。ロータの 5 自由度 (Z , X , Y , θ_x , θ_y) を能動的に制御するために、上下モータステータの各突極に軸方向位置・回転制御用および傾き・径方向位置制御用の 2 種類のコイルを独立に配置して

Fig. 1 Schematic of proposed 5-DOF control maglev motor

連絡先： 増澤 徹，〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1, 茨城大学工学部機械工学科，
e-mail: masuzawa@mx.ibaraki.ac.jp

^{*1} 茨城大学

いる。浮上ロータに配置した回転用永久磁石とモータステータが発生する磁気支持・回転用の磁界のみを用いてロータの 5 軸制御と回転を行うため、磁気軸受や永久磁石軸受を追加する必要がなくモータを小型化することができる。

2.2 磁気浮上回転制御原理

2.2.1 軸方向位置および回転制御原理

本モータはベクトル制御を行うことで回転用磁界のみを用いて浮上ロータに軸方向支持力と回転トルクを独立に発生させる。Fig. 2 に軸方向支持力発生原理の概要を示す。回転用永久磁石が発生する磁界に対して、制御用電磁石により浮上ロータの上下のエアギャップのうち一方で磁界を強め、もう一方で磁界を弱める。これより、浮上ロータ上下に働く軸方向吸引力に不均衡が生じ、軸方向支持力が発生する。また、永久磁石と制御用電磁石により発生する磁界に位相差を与えることにより回転トルクが発生する。モータ突極の内径、外径を r_1 , r_2 とし、永久磁石の極対数を M , 回転用永久磁石の磁界 B_p と制御用電磁石の磁界 B_e との位相差を Ψ とするとき、浮上ロータに働く軸方向支持力および回転トルクは以下の式で与えられる。

$$F = \frac{(r_2^2 - r_1^2)\pi}{\mu_0} B_p B_e \cos M\Psi \quad (1)$$

$$T = \frac{z(r_2^2 - r_1^2)\pi}{\mu_0} B_p B_e \sin M\Psi \quad (2)$$

本式より、軸方向支持力および回転トルクはそれぞれ制御磁界の大きさと位相差により調節できる。これらを用いて浮上ロータの軸方向位置と回転を制御する。

2.2.2 傾きおよび径方向位置制御原理

本モータのロータ径方向位置および傾きの制御には $P \pm 2$ 極理論を採用する。本理論を用いるために回転用永久磁石の極数 P に対して傾き・径方向位置制御用コイルが発生する磁界の極数 E を $P \pm 2$ 極とする。Fig. 3 に y 軸回りの傾き復元トルクおよび x 軸方向の径方向磁気力の発生原理の説明図を示す。ロータに配置した永久磁石が 8 極、ステータが発生する制御磁界の極数が 6 極の場合について説明する。アキシアルギャップモータに $P \pm 2$ 極理論を用いることにより、Fig. 3 (a) に示すような y 軸回りの傾き復元トルクが発生する。傾き制御磁界を B_t としたとき、浮上インペラに働く傾き復元トルクは次式となる。

Fig. 2 Principle of axial position control

(a) Restoring torque production (b) Radial force production

Fig. 3 Principle of inclination and radial position control

$$F = \frac{(r_2^3 - r_1^3)\pi}{6\mu_0} B_p B_t \quad (3)$$

本式より、浮上インペラの回転角度によらず一定の傾き復元トルクを発生できることが分かる。傾き復元トルクの発生と同時に、 $P \pm 2$ 極理論に基づく磁極配置は Fig. 3 (b) に示すような吸引力と反発力を発生させる。これらの磁気力は径方向成分を含み、浮上インペラに径方向力が発生する。本モータは上下のステータにより傾き復元トルクと径方向力をそれぞれ調節することで、浮上ロータの傾きと径方向位置を独立に制御する。

2.3 浮上ロータの 5 軸制御方式

浮上ロータ 5 軸フィードバック制御系の説明図を Fig. 4 に示す。浮上ロータの X 軸, Y 軸上に配置した渦電流変位センサ (PU-03A, 株式会社電子応用) を用いてロータ径方向位置を計測し、軸方向に三つ配置した渦電流変位センサを用いてロータ軸方向位置と径方向軸周りの傾き角度を計測する。ステータスロットに配置した三つのホールセンサ (HG-302C, 旭化成株式会社) を用いてロータ回転角度を検出する。各センサ出力信号からデジタル PID コントローラを用いて指令制御電流値を決定し、パワーアンプを介して上下ステータの各制御用コイルへ電流を印加することで、浮上ロータ 5 軸を制御する。

Fig. 4 Block diagram of 5-DOF control system

2.4 製作した磁気浮上モータ

小児用人工心臓の目標値をロータ回転数 4000 rpm, トルク 4 mNm において揚程 100 mmHg に対して流量 1.5 L/min を満たすことと決定し, 式(1)から式(3)を用いた理論解析および三次元数値磁場解析をもとに Fig. 5 および Fig. 6 に示す磁気浮上モータを製作した。モータ外径 28 mm, 高さ 41 mm である。ステータコア材料には, 小型モータ製作の簡単さから電磁軟鉄パルク材, ロータ回転に伴い生じる渦電流を抑制するために日立粉末冶金(株)モータ用高性能圧粉磁心材を使用した。軸方向位置・回転制御コイルと傾き・径方向位置制御コイルはそれぞれ 58 巻とした。ロータに配置した永久磁石は厚さ 0.7 mm, 保持力 960 kA/m, 残留磁束密度 1.18 T のネオジウム磁石とした。

2.5 磁気浮上モータの性能評価実験

ステータコア材料を電磁軟鉄および圧粉磁心として製作した 2 種類の磁気浮上モータの軸方向の磁気支持性能および回転性能を評価するために, エアギャップ中の磁束密度分布, 軸方向力, 回転トルクと消費電力の測定を行った。本測定は一つのステータについて行い, 軸方向力測定以外のすべての測定におけるロータとステータ間のエアギャップ長さは 1.5 mm とした。

2.5.1 磁束密度測定

制御用コイルを励磁しない状態において, ロータに配置した永久磁石がエアギャップ中に発生させる磁束密度分布の評価を行った。Fig. 7 に磁束密度測定装置を示す。回転ステージによりモータを回転させ, ガウスメータを用いてエアギャップ中の磁束密度を電気角で 360 deg の角度間を 10 deg 間隔で測定した。

2.5.2 軸方向吸引力測定

エアギャップ 1.5 mm において, 制御用コイルへ与

5-DOF control Double stator maglev motor

Fig. 5 Developed 5-DOF control maglev motor

Fig. 6 Geometric parameters of developed maglev motor

Fig. 7 Magnetic flux density measurement system

Fig. 8 Axial force measurement system

Fig. 9 Rotating torque and energy consumption measurement system

える励磁電流の波高値と位相差の変化に対してモータが発生する軸方向吸引力を測定した。また、ロータとステータ間のエアギャップを変化させたときのモータの軸方向吸引力を測定した。Fig. 8 に軸方向吸引力測定実験装置を示す。励磁電流の波高値を 0 A から 2 A とし、ロータ磁場とステータ磁場の電気角位相差を 0 deg から 180 deg まで変化させた。ロータとステータ間のエアギャップはマイクロメータを用いてステージを動かし 1 mm から 2 mm まで変化させた。

2.5.3 回転トルクおよび消費電力測定

ロータ磁場とステータ磁場の電気角位相差を 90 deg としてロータを回転させ、モータの発生トルクを変化させたときの消費電力の測定を行った。Fig. 9 に回転トルクと消費電力測定装置を示す。モータの回転トルクはヒステリシスブレーキにより負荷を調節することで変化した。ロータ回転数は PI 制御を用いて電流値を調節することで制御し、1000 rpm から 5000 rpm まで変化した。ロータ回転角度の検出は電気角 30 deg 間隔で行った。PI 制御に用いた比例ゲインは 0.5 mA/rpm、積分ゲインは 2.3 mA/(rpm・sec) とし、制御周波数は 10 kHz とした。測定した消費電力からモータ効率を計算し評価を行なった。

3 結果

3.1 磁束密度測定

エアギャップ中の磁束密度分布を Fig. 10 に示す。電磁軟鉄モータおよび圧粉磁心モータの磁束密度の最大値はそれぞれ、0.35 T、0.32 T であり、電磁軟鉄モータは圧粉磁心モータより 9 % 高い磁束密度となった。

3.2 軸方向吸引力測定

ロータ磁場と制御磁場との位相差の変化に対する軸方向吸引力変化の測定結果を Fig. 11 に示す。軸方向吸引力は励磁電流の波高値に比例して増加し、位相差の変化に伴い正弦波状に変化することを確認した。励磁電流 0 A における軸方向吸引力は、電磁軟鉄モータおよび圧粉磁心モータにおいて 5.6 N、5.3 N であった。励磁電流の変化に対する軸方向吸引力の変化量である力係数は電磁軟鉄モータおよび圧粉磁心モータにおいて 1.4 N/A、1.0 N/A であった。永久磁石の磁束により発生する軸方向吸引力、および力係数は電磁軟鉄モータの方が圧粉磁心モータより大きかった。Fig. 12 にエアギャップの変化に対する軸方向吸引力変化の測定結

果を示す。励磁電流 0 A における負のばね係数は、電磁軟鉄モータおよび圧粉磁心モータにおいて、それぞれ 6.9 N/mm、6.5 N/mm であった。

3.3 モータトルクおよび消費電力測定

製作した二種類の磁気浮上モータの発生トルクに対する消費電力およびモータ効率の変化を Fig. 13 に示す。電磁軟鉄モータおよび圧粉磁心モータともに最大回転数 5000 rpm 時に 10 mNm の回転トルクを発生可能であった。各モータの最高効率は、ロータ回転数 5000 rpm 時に電磁軟鉄モータでは 8 mNm において 46 %、圧粉磁心モータでは 6 mNm において 72 % であった。Fig. 14 に励磁電流の変化に対するモータ発生トルクの関係を示す。トルク定数は電磁軟鉄モータおよび圧粉磁心モータにおいて 15.2 N・mm/A、13.6 N・mm/A であった。

Fig. 10 Magnetic flux density distribution produced by the rotor permanent magnet

(a) Soft magnetic iron (b) Powder magnetic core

Fig. 11 Axial force and phase difference characteristics

(a) Soft magnetic iron (b) Powder magnetic core

Fig. 12 Axial force and magnetic air-gap characteristics

(a) Soft magnetic iron

(b) Powder magnetic core

Fig. 13 Power consumption and motor energy efficiency

(a) Soft magnetic iron

(b) Powder magnetic core

Fig. 14 Relationship between torque and excitation current

4 考察

永久磁石がエアギャップ中に発生する磁束密度は圧粉磁心モータの方が電磁軟鉄モータより低い値を示した。本点は、圧粉磁心材料の密度が 7.73 Mg/m^3 、電磁軟鉄バルク材料の密度が 7.87 Mg/m^3 であり、電磁軟鉄バルク材料と比較して鉄の充填度が小さい圧粉磁心材料では、透磁率が低くなるためであると考え。また、軸方向吸引力は磁束密度の大きさに比例するため、磁束密度の結果と同様に圧粉磁心モータは電磁軟鉄モータよりも低い軸方向吸引力を示した。しかし、軸方向吸引力の減少率はわずか 10 %であり十分ロータを磁気支持可能であると考え。

エアギャップの変化に対してモータが発生する軸方

Fig. 15 Iron loss at no-load Fig. 16 Copper loss at no-load

向吸引力の変化の測定結果より、ロータ軸方向中心位置から電磁軟鉄モータは $\pm 0.4 \text{ mm}$ 、圧粉磁心モータは $\pm 0.3 \text{ mm}$ の範囲で上下ステータの軸方向吸引力を釣り合わせることができ、人工心臓に用いる磁気浮上モータとして十分な磁気支持性能を有しているものと考え。

モータの回転性能について、圧粉磁心モータはエアギャップ中の磁束密度が減少しトルク定数が 10 %程度低下したものの、小児用人工心臓に用いるモータの目標性能である回転数 4000 rpm、必要トルク 4 mNm を満たしており十分な回転性能を有していると考え。また、目標動作点において圧粉磁心モータは消費電力を 6 W から 3 W まで低減することができ、人工心臓として十分低い消費電力であると考え。本点は、圧粉磁心を用いることでステータコアに渦電流が流れにくくなり鉄損が減少すると同時に、銅損を低減できたためである。Fig. 15, Fig. 16 にロータ回転数に対する無負荷時の鉄損と銅損をそれぞれ示す。鉄損は入力電力と銅損の差から算出し、銅損はコイルの抵抗値と電流値から算出した。ロータの回転数増加に伴う鉄損の増量は圧粉磁心において著しく減少する。これに付随して、鉄損を補いロータを回転させるために必要な電流による銅損も減少する。結果的に鉄損と銅損ともに減少することが分かる。

5 結言

小児用人工心臓のためのロータ 5 自由度を能動的に制御する小型なダブルステータ型アキシアルギャップセルフベアリングモータを新規に提案し、製作、評価を行った。ステータ材料に圧粉磁心を用いたモータは、電磁軟鉄を用いたモータと比較して磁気吸引力および回転トルクが 10 %低下したが、目標回転数 4000 rpm、発生トルク 4 mNm において消費電力を 3 W 低減でき、高効率なモータを実現可能であることを確認した。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金（特別研究員奨励費）の補助を受け遂行された。ここに記して謝意を表する。

(2014 年 4 月 23 日受付)

参考文献

- [1] 小野稔, 補助人工心臓の現状と展望, 小児内科, vol.42, No.5, pp.784-788, 2010.
- [2] J.Timothy Baldwin, Harvey S. Borovets, Brian W. Duncan, Mark J. Gartner, Robert K. Jarvik, William J. Weiss and Tracey R. Hoke, The National Heart, Lung, and Blood Institute Pediatric Circulatory Support, Journal of the American heart association, pp. 147-155, 2006.
- [3] Marc Gibber, Zhongjun J. Wu, Won-Bae Chang, Giacomo Bianchi, Jingping Hu, Jose Garcia, Robert Jarvik, Bartley P. Griffith, In Vivo Experience of the Child-Size Pediatric Jarvik 2000 Heart: Update, ASAIO Journal, Vol. 56, No. 4, 2010.
- [4] Setsuo Takatani, Hideo Hoshi, Kennichi Tajima, Katsuhiro Ohuchi, Makoto Nakamura, Tadahiko Shinshi, Masaharu Yoshikawa, Feasibility of a Miniature Centrifugal Rotary Blood Pump for Low-Flow Circulation in Children and Infants, ASAIO Journal, Vol. 51, No. 5, pp. 557-562, 2005.
- [5] Noh, M.D., Antaki, J.F., Ricci, M.Gardiner, Magnetic Levitation Design for the PediaFlow Ventricular Assist Device, Proc. 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 1077-1082, 2005.
- [6] Matthias Glauser, Wei Jei Jiang, Guoxin Li, Zongli Lin, Paul E. Allaire, Don Olson, Charles L. Brown, Optimization of an Axial Flow Heart Pump With Active and Passive Magnetic Bearings, Artificial Organs, Vol. 30, No.5, pp. 400-405, 2006.
- [7] Daniel L. Timms, Nobuyuki Kurita, Nicholas Greatrex, Toru Masuzawa, BiVACOR A Magnetically Levitated Biventricular Artificial Heart, Proc. of MAGDA conference in Pacific Asia, pp.482-487, 2011.
- [8] Hideo Hoshi, Tadahiko Shinshi, Setsuo Takatani, Third-generation Blood Pumps With Mechanical Noncontact Magnetic Bearings, Artificial Organs, Vol. 30, No. 5, pp. 324-338, 2006.
- [9] David J. Farrar, Kevin Bourque, Charles P. Dague, Christopher J. Cotter, Victor L. Poirier, Design Features, Developmental Status, and Experimental Results With the Heartmate III Centrifugal Left Ventricular Assist System with a Magnetically Levitated Rotor, ASAIO Journal, Vol. 53, No. 3, pp. 310-315, 2007.
- [10] Quang Dich Nguyen, Satoshi Ueno, Analysis and Control of Nonsalient Permanent Magnet Axial Gap Self-Bearing Motor, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, No. 7, pp. 2644-2652, 2011.
- [11] Keigo Ukita, Toru Masuzawa, Hiroyuki Onuma, Takashi Nishimura, Shunei Kyo, A radial Type Self-Bearing Motor for Small Maglev Regenerative Blood Pump, Journal of JSAEM, Vol. 20, No. 2, pp. 312-318, 2012.
- [12] Masahiro Osa, Toru Masuzawa, Eisuke Tatsumi, Miniaturized axial gap maglev motor with vector control for pediatric artificial heart, Journal of JSAEM, Vol. 20, No. 2, pp. 397-403, 2012.
- [13] Atsushi Yukawa, Tadahiko Shinshi, Xiayou Zhang, Hiroyuki Tachikawa, Akira Shimokohbe, A One-DOF Controlled Magnetic Bearing for Compact Centrifugal Blood Pumps, Motion and Vibration Control, Springer Science+Business Media B.V., pp. 357-366, 2009.
- [14] Junichi Asama, Yuki Hamasaki, Takaaki Oiwa, Akira Chiba, Proposal and Analysis of a Novel Single-Drive Bearingless Motor, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 1, pp. 129-138, 2013.