

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月20日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560240

研究課題名（和文）連続流人工心臓用小型・高性能・高効率セルフベアリングモータの開発

研究課題名（英文）Development of a smaller, high-performance, and high-efficiency self-bearing motor for continuous-flow artificial heart

研究代表者

松田 健一（MATSUDA Kenichi）

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：30302326

研究成果の概要（和文）：本研究では、浮上回転するロータを支持するための5つの自由度をすべて能動的に制御することで、磁気軸受システムとしての高性能を維持したまま小型化と高効率化が実現可能なIPM型5軸制御セルフベアリングモータを提案した。理論的な制御力を導出すると共に、磁場解析に基づき、IPM型5軸制御セルフベアリングモータの試作1号機を製作した。この試作機を用いた実験により、従来のIPM型永久磁石配置では大きなコギングトルクが発生し、安定した浮上回転が難しいことを確認した。そこで磁束回収型永久磁石配置を提案し、提案に基づき製作した2号機は、コギングトルクの大幅な低減に加えモータ基本特性の改善が可能であることを確認した。現在実験を継続中であるが、小型化と高性能化を兼ね備えたシステムが十分に実現可能であると考えている。

研究成果の概要（英文）：A novel 5-DOF actively controlled self-bearing motor that combines the functions of a motor, two radial AMBs, and an axial AMB has been proposed. It is possible to downsize and high efficiency with maintaining high performance simultaneously. With the derivation of theoretical control forces, prototype of the first IPM type 5-DOF self-bearing motor was made based on the three dimensional magnetic field analyses. The experimental results showed that the prototype rotor generates considerable cogging torque and the stable rotation with levitation. Therefore the flux recovery type permanent magnets configuration has been proposed and second IPM type one is made. It achieved a major reduction of the cogging torque. In addition, the proposed flux recovery type one improved the fundamental motor characteristics.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：メカトロニクス、バイオメカトロニクス

1. 研究開始当初の背景

現在臨床応用されている拍動流補助人工心臓は症例の増加と埋込み期間の長期化に伴い、血栓塞栓症、感染、機械的信頼性や小柄な患者への適応が困難等の問題点が明らかになっている。この問題点を克服するポンプとして、近年連続流ポンプの埋込み型人工心臓への応用研究の報告がなされてきた。特に回転軸を支持する機械的な軸受を必要としない電磁力を利用した磁気浮上型遠心ポンプは、機械的な信頼性が高く長寿命であり、その開発が切望されている。

最近の磁気浮上方式としては、赤松(京大)と NTN(株)が共同で考案した磁気軸受方式の浮上型遠心ポンプによる補助人工心臓の臨床試験を、テルモ(株)がドイツでスタートし世界初の磁気浮上方式左心補助人工心臓の実用化を実現させている。また、東京医科歯科大と進士(東工大)らのグループは、受動安定性を用いた 2 軸制御の小型磁気軸受と Halbach 型ローレンツモータを利用した小型の人工心臓用遠心ポンプの開発を進めている。

一方海外では、スイスの Levitronix が CentriMag という補助人工心臓を商品化しているが、受動安定性を利用したラジアル方向 2 軸制御のみのセルフベアリングモータを用いたもので、体外設置型で 2 週間までに利用が限定されている。またアメリカで開発中の HeartMate III も、CentriMag と同様に受動安定性を利用した 2 軸制御のセルフベアリングモータを用いたシステムである。現在完全埋込型としては、限定的に重症患者に使われる LionHeart があるが、これは拍動式のタイプである。

磁気軸受やセルフベアリングモータを利用したこれらの方式は、人工心臓用ポンプの小型化の必要性もあり、一部受動安定性を利用したシステムとなっている。したがって、患者が転倒しポンプに大きな加速度が加わった場合など、突然のアクシデントに対する安全性や信頼性という点で問題が残っている。

本研究で提案するセルフベアリングモータは、単一ロータという非常に小型でありながら全自由度を能動的に制御し、かつエネルギー消費を抑えることが可能である。したがって、安全性や信頼性という問題を克服すると同時に、小型化や低エネルギー消費を可能とする唯一ともいえる方式である。

2. 研究の目的

人工心臓用アクチュエータとして適用可能な、小型化と高性能さらに高効率化を実現できる、単一ロータによる 5 軸制御型セルフベアリングモータ(磁気浮上モータ)の開

発である。

3. 研究の方法

(1) これまでの表面に永久磁石を貼り付ける、Surface Permanent Magnet (SPM) 型の 5 軸制御セルフベアリングモータに対し、Interior Permanent Magnet (IPM) 型 5 軸制御セルフベアリングモータは、永久磁石をロータ内部に埋め込む方式であるため、

- ・永久磁石の形状設計の自由度が高い
- ・永久磁石張り付けが不要で信頼性が高い
- ・高速回転が可能
- ・高効率化が可能

などの特徴を持つ。

まず、小型化が可能で、5 軸制御が実現可能な 3 タイプの IPM 型ロータについて、その内部構造と軸方向力および傾き制御トルク発生原理を、有限要素法ソフトウェア ANSYS を用いた 3 次元磁場解析により検討する。

(2) 最も有力な方式について、より最適な磁石配置と形状、モータトルクや制御力及び相互作用などについてさらに詳細に検討し、5 軸制御セルフベアリングモータの基本設計を行う。

(3) 最適な形状が決定次第、積層鋼板コアの発注を行い、試作 1 号機の製作に取りかかるとともに、試作機による浮上回転実験により本モータの実現性を検証する。

(4) 平行して各制御力やモータ特性について検討を加える。さらに、人工心臓用アクチュエータとして適用するために、より小型化が可能で、コギングトルクの少ない IPM ロータについて検討し、永久磁石の配置など最適形状や巻線構成について検討する。

(5) 最適な形状が決定次第、積層鋼板コアの発注を行い、試作 2 号機の製作に取りかかるとともに、試作機による浮上回転実験により本モータの実現性を検証し、平行して各制御力の相互作用や安定性解析を行い、制御方式について検討を加える。さらに、モータ性能についても評価を行う。

4. 研究成果

(1) 3 タイプの IPM ロータについて検討した。タイプ 1 は永久磁石を $\pi/2$ ごとに放射状に配置しその両側に長さ半分の永久磁石を配置した形状、タイプ 2 は円弧型の永久磁石をロータ外周から 0.5mm の位置に埋め込む構造をとった形状、最後にタイプ 3 は永久磁石を四角形状に配置した形状である。

3 次元磁場解析の結果から、タイプ 3 は永久磁石を四角形状に配置した形状が最も有力であることを示した。

(2) 解析に基づき、試作 1 号機を制作しその特性を確認したところ、無視できないコギングトルクが発生しており、さらなる改善が必

要であることを確認した。

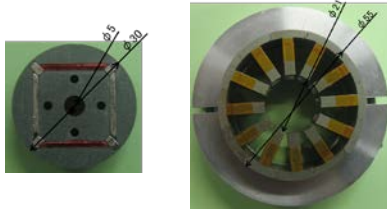


写真1 IPM型5軸制御セルフベアリングモータ試作機

(3) 検討の結果、磁束収束型永久磁石配置を提案した。この永久磁石配置は、一対の永久磁石をロータの各極の主極部永久磁石に対して垂直になるように配置する。追加した永久磁石により、磁極の両端部で磁束の回り込みが回収され、その回収した磁束を中央部主磁束方向に集中させることができるため、コギングトルクの軽減に加え、モータの基本特性改善につながる構造になっており、コギングトルクの大幅な低減化が可能である。

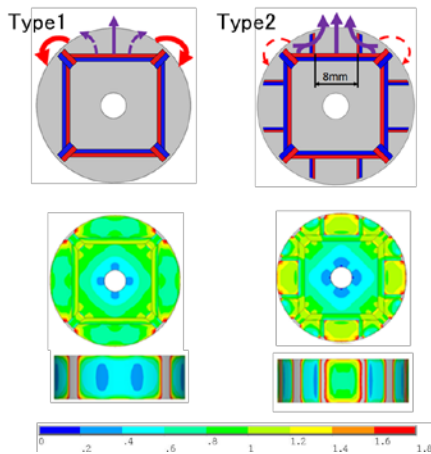


図1 磁束回収型 IPM ロータの提案

(4) この、磁束収束型永久磁石配置は、電気自動車の低速時のコギングトルク改善や高効率化につながり、IPM モータに適用可能であり現在特許申請中である。

(5) 解析結果に基づき、IPM ロータの試作 2 号機を製作し、モータ特性について比較検討した。その結果、最大トルクは 30mNm であり、最大効率は 67.5%、使用を想定している条件での消費電力は 6.35[W] であり効率は 59.31%であることを確認した。また、回転数 300rpm の際に Type2 の最大効率が 23.83% であることにに対し Type3 では 29.21% と 5% 以上の差が見られた、このことから Type3 の IPM ロータは低速領域でも安定した回転制御を行えたことが確認できた。以上の結果から、今回開発した IPM 型 5 軸制御セルフベアリングモータは、小型モータとしては高効率で低コギングトルクという高い性能を有していることが確認した。

現在、さらに研究を継続中である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 16 件)

①鈴木浩成、岡田養二、松田健一、麻生公通、榎園正人、極低温ポンプ用磁気軸受の開発と応用、査読無、第 21 回MAGDAコンファレンス講演論文集、2012、pp. 353-356

②佐藤心平、松田健一、近藤良、増澤徹、IPM 型 5 軸制御セルフベアリングモータのコギングトルク低減に関する研究、査読無、第 21 回MAGDAコンファレンス講演論文集、2012、pp. 349-352

③玉置将也、松田健一、近藤良、増澤徹、ホモポーラ型 5 軸制御セルフベアリングモータの開発、査読無、茨城講演会講演論文集、2012、pp. 219-220

④平根龍也、松田健一、近藤良、増澤徹、小型・高性能アウターロータ型 5 軸制御セルフベアリングモータの開発、査読無、茨城講演会講演論文集、2012、pp. 217-218

⑤松田健一、玉置将也、岡田養二、近藤良、増澤徹、ホモポーラ型 5 軸制御セルフベアリングモータの提案、査読無、第 24 回「電磁力関連のダイナミクス」講演会講演論文集、2012、pp. 451-452

⑥松田健一、佐藤心平、近藤良、増澤徹、IPM 型 5 軸制御セルフベアリングモータの永久磁石配置に関する研究、査読有、日本機械学会論文集C編、Vol. 78, No. 789, 2012, pp. 1811-1815
https://www.jstage.jst.go.jp/article/kiikaic/78/789/78_1811/_pdf

⑦松田健一、佐藤心平、近藤良、増澤徹、IPM 型 5 軸制御セルフベアリングモータの永久磁石配置に関する研究、査読無、日本機械学会 [No. 11-2] Dynamics and Design Conference 2011 CD-ROM論文集、2011、pp. 1-7

⑧岡田養二、近藤良、松田健一、榎園正人、永久磁石併用磁気軸受システムの開発、査読無、日本機械学会 [No. 11-2] Dynamics and Design Conference 2011 講演論文集、2011、pp. 1-9

⑨鈴木浩成、岡田養二、松田健一、竹中智哉、永久磁石併用磁気軸受システムの開発、査読無、茨城講演会講演論文集、2011、pp. 93-94

⑩佐藤心平、松田健一、近藤良、増澤徹、IPM型5軸制御セルフベアリングモータに関する研究、査読無、茨城講演会講演論文集、2011、pp. 91-92

⑪松田健一、岡田養二、鈴木浩成、竹中智哉、榎園正人、永久磁石併用磁気軸受システムの研究、査読無、第23回「電磁力関連のダイナミクス」講演会講演論文集、2011、pp. 259-264

⑫Y. Okada, K. Matsuda, H. Suzuki, T. Takenaka, M. Enokizono, Experimental Comparison of Rotor Side versus Stator Side Permanent Magnet Biased (Hybrid type) Axial Magnetic Bearings, 査読無, Proc. of The 20th MAGDA Conference in Pacific Asia, 2011, pp. 471-475

⑬松田健一、寺山昌幸、近藤良、増澤徹、アウターロータ型5軸制御型セルフベアリングモータの開発、査読有、日本機械学会論文集C編, Vol. 77, No. 777, 2011, pp. 1949-1959 https://www.jstage.jst.go.jp/article/kiikaic/77/777/77_777_1949/_pdf

⑭松田健一、鈴木浩成、岡田養二、榎園正人、ステータに永久磁石を持つアキシヤル磁気軸受の開発、査読無、第19回MAGDAコンファレンス講演論文集、2010、pp. 377-380

⑮松田健一、寺山昌幸、近藤良、増澤徹、アウターロータ型5軸制御型セルフベアリングモータの開発、査読無、日本機械学会 [No.10-8] Dynamics and Design Conference CD-ROM論文集、2010、pp.1-5

⑯松田健一、佐藤心平、近藤良、増澤徹、IPM型5軸制御セルフベアリングモータの提案、査読無、第22回「電磁力関連のダイナミクス」講演会講演論文集、2010、pp. 20-21

[学会発表] (計 14件)

①鈴木浩成、『極低温ポンプ用磁気軸受の開発と応用』、第21回MAGDAコンファレンス講演会、2012年11月21日、仙台市戦災復興記念館

②佐藤心平、『IPM型5軸制御セルフベアリングモータのコギングトルク低減に関する研究』、第21回MAGDAコンファレンス講演会、2012年11月21日、仙台市戦災復興記念館

③玉置将也、『ホモポーラ型5軸制御セルフベアリングモータの開発』、第20回茨城講演会、2012年08月24日、茨城大学

④平根龍也、『小型・高性能アウターロータ型5軸制御セルフベアリングモータの開発』、第20回茨城講演会、2012年08月24日、茨城大学

⑤松田健一、『ホモポーラ型5軸制御セルフベアリングモータの提案』、第23回「電磁力関連のダイナミクス」講演会、2012年05月16日、富山国際会議場

⑥Y. Okada, 『Experimental Comparison of Rotor Side versus Stator Side Permanent Magnet Biased (Hybrid type) Axial Magnetic Bearings』, The 20th MAGDA Conference in Pacific Asia, November 14, 2011, Garden Villa, Kaohsiung, Taiwan

⑦松田健一、『IPM型5軸制御セルフベアリングモータの永久磁石配置に関する研究』、日本機械学会 [No.11-2] Dynamics and Design Conference 2011 講演論文集、2011年9月8日、高知工科大学

⑧岡田養二、『永久磁石併用磁気軸受の開発と応用』、日本機械学会 [No.11-2] Dynamics and Design Conference 2011 講演論文集、2011年9月8日、高知工科大学

⑨鈴木浩成、『永久磁石併用磁気軸受システムの開発』、第19回茨城講演会、2011年8月26日、茨城大学工学部

⑩佐藤心平、『IPM型5軸制御セルフベアリングモータに関する研究』、第19回茨城講演会、2011年8月26日、茨城大学工学部

⑪松田健一、『永久磁石併用磁気軸受システムの研究』、第23回「電磁力関連のダイナミクス」講演会、2011年5月18日、愛知県産業労働センター

⑫松田健一、『ステータに永久磁石を持つアキシヤル磁気軸受の開発』、第19回MAGDAコンファレンス講演会、2010年11月22日、北海道大学学術交流会館

⑬松田健一、『アウターロータ型5軸制御型セルフベアリングモータの開発』、日本機械学会 [No.10-8] Dynamics and Design Conference、2010年9月15日、同志社大学京田辺キャンパス

⑭松田健一、『IPM型5軸制御セルフベアリングモータの提案』、第22回「電磁力関連のダイナミクス」講演会、2010年5月19日、門

司港ホテル

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

名称：永久磁石埋込型モータ

発明者：松田健一

権利者：茨城大学

種類：特許

番号：特願 2012-254549

出願年月日：2012 年 11 月 20 日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://info.ibaraki.ac.jp/scripts/websearch/index.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松田 健一 (MATSUDA KENICHI)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：30302326

(2) 研究分担者

近藤 良 (KONDO RYOU)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：90186867