

令和元年6月12日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06173

研究課題名(和文) 両心補助人工心臓用ホモポーラ・コンシクエント統合型5軸制御セルフベアリングモータ

研究課題名(英文) Homopolar-consequent integrated type 5-DOF self-bearing motor for biventricular assist device

研究代表者

松田 健一 (Matsuda, Kenichi)

茨城大学・理工学研究科(工学野)・准教授

研究者番号：30302326

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、左心と右心のポンプに連結したモータ軸を軸方向に移動させ両心の流量を独立に制御可能で、かつ小型で高い安定性を有する両心補助人工心臓用5軸制御セルフベアリングモータの開発を行った。

開発したモータは、回転速度3500rpmにおけるモータ効率が52%を示し、径方向の4軸浮上制御による回転実験において、3000rpmでの径方向の最大変位が0.012mmと高い安定性を示した。さらに、軸方向に0.5mmの変位を与えた5軸制御においても、3000rpmでの径方向最大変位が0.0146mmと高い安定性を示し、両心補助人工心臓ポンプに十分に適用可能な高い性能を有することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでの両心補助人工心臓ポンプは、一部受動安定性に依存させることで小型化を実現してきた。本研究では、左心と右心のポンプに連結した単一モータの回転軸を、軸方向に移動させポンプの2次流れを変化させることにより流量を調整する方式を採用した。したがって、開発するモータは、軸方向のサーボ機能を有する必要があるが、小型化が可能なアキシヤル制御部と、高性能化のためのホモポーラ・コンシクエント統合型セルフベアリングモータの採用により、5軸制御で信頼性が高く長期間使用可能な両心補助人工心臓ポンプが実現可能となり、将来的に両心補助が必要な対象者のQuality of Life (QOL) 改善に大きく貢献できる。

研究成果の概要(英文)： In this study, a small and high-performance 5-DOF self-bearing motor is proposed and developed for a biventricular assist device. It possesses the function of a motor, two radial magnetic bearings, and an axial magnetic bearing. The proposed motor model is analyzed by three dimensional finite element methods and the prototype is made and tested. In radial 4-axis rotation test, the maximum radial whirling displacement is only 0.012mm at 3000rpm. Furthermore, in 5-axis rotation test with axial movement at 0.5mm, the maximum radial whirling displacement is 0.0146mm at 3000rpm. From the results, the proposed homopolar-consequent integrated type 5-DOF self-bearing motor show high feasibility for bi-ventricular assist device or total artificial heart.

研究分野：メカトロニクス

キーワード：磁気軸受 セルフベアリングモータ ホモポーラモータ 両心補助人工心臓

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

人工心臓ポンプの長期使用が避けられない現状において、拍動流補助人工心臓は機械的信頼性や小柄な患者への適応が困難、感染症等の問題が明らかになっている。

国内では、この問題点を克服する連続流方式補助人工心臓として、メカニカルシールを用いた遠心ポンプであるサンメディカル技術研究所の EVAHEART や、世界初の磁気浮上技術を用いた遠心ポンプ方式を採用したテルモ社の DuraHeart が、平成 23 年 3 月に保険医療として承認されている。DuraHeart はセンサコードの不具合により使用が中断したが、磁気浮上システムの本質的な有効性や安全性が変わることはない。さらに、小児にも適用可能な動圧軸受を用いた軸流ポンプ方式の小型補助人工心臓の開発が、国立循環器病研究センター、産業技術総合研究所、三菱重工業(株)、ニプロ(株)により進められている。

一方海外では、機械軸受を用いた軸流ポンプ方式の HeartMate II や Jarvik 2000 などがよく知られているが、近年、動圧軸受をアキシヤル側に永久磁石磁気軸受をラジアル側に用いた HeartWare 社の HVAD が急激に臨床例を増やしている。また磁気軸受を用いた小型の軸流ポンプ方式として、Berlin Heart 社の INCOR が製品化されている。

日本では、欧米に比べ補助人工心臓を長期に使用する傾向にあり、ポンプの長期的な安全性、信頼性が重要になっている。磁気浮上方式の人工心臓は、長期使用が可能であるが、これまで開発されてきた製品は全て部分的に受動安定性に依存しており、信頼性の面でより改善が必要と思われる。現在のところ、単一モータで 5 軸全てを能動的に制御し小型化を達成しているのは、世界的に見ても申請者らが提案している 5 軸制御セルフベアリングモータ以外に見当たらず、研究継続の重要性を感じている。

補助人工心臓に依存する対象者の増加に伴い、左心、右心の同時補助が必要な事例が生じており、小型の両心補助人工心臓の開発が重要課題になってきている。2005 年頃、米国において HeartMate III や Jarvik2000 を 2 台使用した全人工心臓手術や、最近では、大阪大において、左心室に DuraHeart を、右心室に Jarvik 2000 (RV 型) を使用した両心補助手術の例が報告されている。装置が小型化してきたとはいえ、2 台のポンプを体内に埋め込むことは患者にとって大きな負担になる。そのため、アキシヤルセルフベアリングモータで両心を補助する人工心臓ポンプ (BiVAD) が、QUT と茨城大学のグループにより提案されている。使用するモータは、アキシヤルセルフベアリングモータをベースとして、軸方向と傾きを制御可能な 3 軸制御方式を採用し小型化を実現している。

本研究では、長期使用を想定し小型でより信頼性の高い両心補助人工心臓を実現するために、5 軸全てを能動的に制御する、ホモポーラ・コンシクエント統合型 5 軸制御セルフベアリングモータを開発する。

2. 研究の目的

本研究は、両心補助人工心臓に適用可能できる、小型で高性能なホモポーラ・コンシクエント統合型 5 軸制御セルフベアリングモータの開発を目的としている。

ホモポーラ型モータのロータ部は、ロータ中央に小型の軸方向制御ユニットを組み込み、その両側に 2 つのホモポーラ永久磁石を配置し径方向と軸方向の制御時の干渉をなくして特性改善を図るとともに、ホモポーラモータ部の突極間にコンシクエントポール磁石を付加しトルク特性の改善を図ることで、小型、高性能に加え、両心補助に重要な軸方向のサーボ機能を持つ 5 軸制御セルフベアリングモータが実現可能となる。

ロータ部の両端にポンプインペラを取り付け、ロータの軸方向変位と回転数を制御することで、両心の流量と吐出圧力を独立して制御可能な、小型で信頼性の高い両心補助人工心臓を開発することができる。

3. 研究の方法

(1) 解析対象である両心補助人工心臓は、左心 13,300Pa (100mmHg)、右心 2,660Pa (20mmHg) の吐出圧力と、定常的に 5L/min という流量を確保する必要がある。この場合、ポンプ効率を考慮しても、40mN・m のモータトルクがあれば十分と考えられる。また支持性能としては、安全性を考慮し自重の 5 倍、5G の加速度に耐えられる制御力を目標値として設定する。

有限要素法ソフト ANSYS を用いた 3 次元磁場解析により、以下の項目について検討する。

- ・バイアス用永久磁石とバイアス磁束経路
- ・必要モータトルク発生のための突極数やステータ形状
- ・必要径方向力、軸方向力発生のためのロータ・ステータの形状

検討後、有力な形状を用いて 5 軸制御セルフベアリングモータの基本設計を行う。

(2) 基本設計が決定次第、積層鋼板コアの発注を行うと共に、モータホルダやタッチダウン等のモータ周辺の関連する装置部品についても発注を行う。部品が到着次第、試作機の組み立てに取りかかり、この試作機を用いてまず径方向の 4 軸浮上回転実験により本モータの実現性を検証する。

(3) 本方法の最大の特長は、軸方向制御に対向する形状の制御部を必要としない構造であるため、高い受動安定性を有し、軸方向の移動量をより広く設定しサーボ制御することが可能である。最終的に 5 軸浮上回転実験により、軸方向に変位指令を与えたサーボ制御時の浮上回転実験により本モータの実現性を検証し評価を行う。

4. 研究成果

(1) 解析モデルとして、実験の容易さを考慮し、ステータ外径 100mm、幅 26.9mm とし、ロータ部は両側のモータ部が外径 30mm、中央の軸方向制御部が 29mm、幅 24.7mm とした。ロータ部は、ホモポーラ用にネオジウム磁石 N-42 (保磁力 915kA/m)、コンシクエントポール用に N-27 (保磁力 796kA/m) を用い、ロータ部の質量は 97.5g である。ステータ巻線の最大起磁力は、径方向巻線 40Aturn、軸方向巻線 100Aturn、回転巻線 50Aturn とした。解析は、有限要素法による汎用解析ソフト ANSYS を用い、各巻線それぞれに最大励磁したとき、回転トルク、制御力ともに人工心臓の要求性能を達成できることを確認した。

(2) 解析に基づき、試作機を制作した。回転トルクや径方向力を発生するロータ部の両端と対向するステータ部はどちらも渦電流を抑える積層ケイ素鋼板を用い、中央の軸方向力を発生するロータ部とステータ部は、形状的に積層ケイ素鋼板での製作が難しいため電磁軟鉄を使用した。巻線は高い占積率を実現できる平角線を使用した。

(3) 中央に 1 個の永久磁石を配置する通常ホモポーラロータ構造では、径方向制御と軸方向制御において構造的に制御磁束の干渉が生じるため、ロータ両端部と中央の軸方向制御ユニット間にそれぞれ永久磁石を挟む構造とすることで干渉をなくし、モータ部の突極間にコンシクエントポール磁石を付加しトルク特性の改善を図ることで、両心補助人工心臓ポンプの目標性能を達成可能なホモポーラ・コンシクエント統合型 5 軸制御セルフベアリングモータを提案した。モータの概要を図 1 に、ロータ部の写真を図 2 に、巻線を配置したモータ全体の写真を図 3 に示す。

(4) 本モータを用いたモータ特性実験の結果、人工心臓適用時のモータの定常的な運転状態である回転数 3000rpm 負荷トルク 14.1mN・m において、消費電力は 10W 程度である。また最大モータ効率、回転速度 3500rpm、負荷トルク 7mN・m において 52.0% であった。

(5) 本モータを用いた浮上回転実験では、径方向の 4 軸制御による浮上回転実験において、3000rpm における最大変位が 0.012mm と高い安定性を示すことを確認した。次に、本研究の最も重要なポイントである軸方向の受動安定特性およびサーボ制御特性について解析と実験を行った。解析の結果、軸方向復元力のバネ剛性が 0.33N/mm と良好な値を持つことがわかった。さらに、軸方向に 0mm から 0.5mm まで 0.1mm 間隔で位置指令を与える 5 軸制御サーボ特性実験を行い、回転数 3000rpm、軸方向変位 0.5mm において、径方向の最大変位は 0.0146mm であり、軸方向に変位を与えても高い安定性を示すことを確認した。以上の結果より、本研究で提案したホモポーラ・コンシクエント統合型 5 軸制御セルフベアリングモータが、両心補助人工心臓ポンプに十分に適用可能な高い性能を有することを確認した。

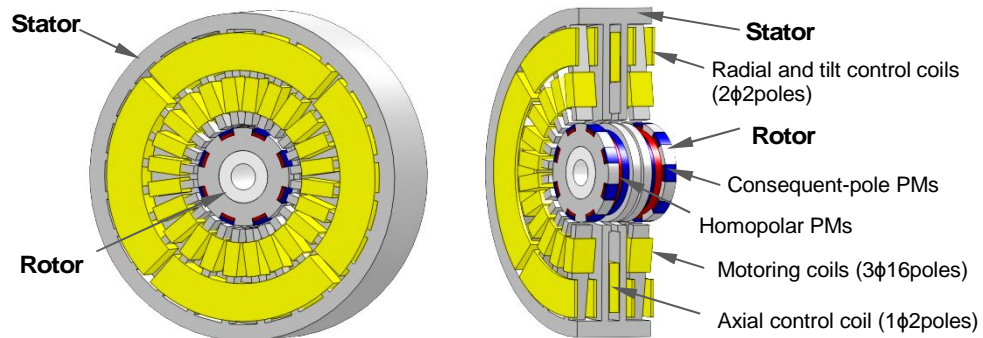


図 1 Configuration of homopolar and consequent integrated type 5-DOF self-bearing motor.



図 2 Photo of proposed rotor

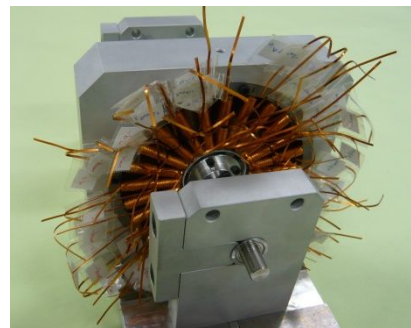


図 3 Photo of proposed motor with windings

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 12 件)

松田健一、人工心臓ポンプに適用可能な 5 軸制御セルフベアリングモータの開発、第 46 回磁気軸受のダイナミクスと制御研究会 & 第 8 回磁気浮上・磁気支持に関する ITC 応用技術調査専門委員会合同研究会講演資料集、査読無、2019、pp.1-10

松田健一、鈴木力、近藤良、増沢徹、ホモポーラ・コンシクエント統合型 5 軸制御セルフベアリングモータに関する研究、Dynamics and Design Conference 2018 講演論文集、査読無、2018、pp.1-12

岡田養二、安東和人、松田健一、近藤良、小型歩行補助ロボット用高効率モータの開発、第 30 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集、査読無、2018、pp.580-583

Yohji Okada, Kazuto Antou, Kenichi Matsuda, Ryou Kondo, Development of Compact and High Torque 16 Pole 18 Slot Motor for Power Assist Legs, The Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読無、2018、pp.22-23

松田健一、原田誠、近藤良、増沢徹、コンシクエントポール型 5 軸制御セルフベアリングモータに関する研究、第 15 回「運動と振動の制御」シンポジウム USB 講演論文集、査読無、2017、pp. 1-9

櫛引伶矢、松田健一、近藤良、増沢徹、ワイドギャップに適用可能な磁路制御磁気軸受の最適化、第 25 回茨城講演会 CD-ROM 講演論文集、査読無、2017、pp. 1-2

松田健一、岡田養二、戸高孝、近藤良、わかりやすい慣性主軸制御の提案、第 29 回「電磁力関連のダイナミクス」講演論文集、査読無、2017、pp. 133-136

Yohji Okada, Masaki Touno, Kenichi Matsuda, Ryou Kondo, Takashi Todaka, Six pole type hybrid magnetic bearing for turbo-machinery, Mechanical Engineering Journal Vol.4, No.5, 査読有、2017、pp.1-11
DOI: <https://doi.org/10.1299/mej.16-00579>

向井崇史、松田健一、近藤良、増沢徹、PR 型セルフベアリングモータの基本特性解析、第 23 回茨城講演会講演論文集、査読無、2016、pp.157-158

松田健一、宮島要、近藤良、増沢徹、ワイドギャップに適用可能な磁路制御型磁気軸受、第 28 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集、査読無、2016、pp.1-12

松田健一、藤野允基、岡田養二、戸高孝、近藤良、6 突極型ハイブリッド磁気軸受の開発、第 28 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集、査読無、2016、pp. 404-407

Yohji Okada, Masaki Touno, Kenichi Matsuda, Ryou Kondo, Takashi Todaka, Six pole type hybrid magnetic bearing for turbo-machinery, Proceedings of The 15th International Symposium on Magnetic Bearings, 査読無、2016、pp.1-8

[学会発表](計 11 件)

松田健一、人工心臓ポンプに適用可能な 5 軸制御セルフベアリングモータの開発、日本機械学会・電気学会、2019

松田健一、ホモポーラ・コンシクエント統合型 5 軸制御セルフベアリングモータに関する研究、日本機械学会、2018

岡田養二、小型歩行補助ロボット用高効率モータの開発、日本 AEM 学会、2018

Yohji Okada, Development of Compact and High Torque 16 Pole 18 Slot Motor for Power Assist Legs, The Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 2018

松田健一、コンシクエントポール型 5 軸制御セルフベアリングモータに関する研究、日本機械学会、2017

櫛引伶矢、ワイドギャップに適用可能な磁路制御磁気軸受の最適化、日本機械学会、2017

松田健一、わかりやすい慣性主軸制御の提案、日本機械学会、日本 AEM 学会、2017

向井崇史、PR 型セルフベアリングモータの基本特性解析、日本機械学会、2016

松田健一、ワイドギャップに適用可能な磁路制御型磁気軸受、日本機械学会、2016

松田健一、6 突極型ハイブリッド磁気軸受の開発、日本 AEM 学会、2016

Yohji Okada, Six pole type hybrid magnetic bearing for turbo-machinery, International Symposium on Magnetic Bearings, 2016

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：近藤 良

ローマ字氏名：(KONDO, ryou)

所属研究機関名：茨城大学

部局名：理工学研究科(工学野)

職名：教授

研究者番号(8桁): 90186867

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。