

平成 21 年 4 月 13 日現在

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2005～2008 年度

課題番号：17360129

研究課題名 (和文) シンプルなベアリングレスドライブの試作

研究課題名 (英文) Development of a simple bearingless drive

研究代表者

千葉 明 (Chiba Akira)

東京理科大学・理工学部・電気電子情報工学科・教授

研究者番号：30207287

研究成果の概要：半導体製造装置、埋込型人工心臓、ケミカルポンプ、フライホイールなどに非接触で浮上するモータが要求されている。申請者らは平成元年より磁気浮上して回転するベアリングレスモータの研究を行ってきた。研究開始当初は人の背丈ほどのドライバ、コントローラが必要であった。本研究では、シンプルなベアリングレスモータとそのドライブ回路を試作し、A5 程度の大きさに小型化した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005 年度	6,700,000	0	6,700,000
2006 年度	2,200,000	0	2,200,000
2007 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
総計	12,300,000	1,020,000	13,320,000

研究分野：電力工学・電気機器類

科研費の分科・細目：5101

キーワード：ベアリングレスモータ、磁気浮上、モータ

1. 研究開始当初の背景

近年、二酸化炭素の排出量を減少し、環境負荷を低減することが急務になっている。使用電力を低減するためには電力消費の 70% を占めるドライブとその負荷機械の高効率化が必要である。

コンプレッサ、冷凍機、ブロワ、ポンプなどでは、回転翼と電動機を一体化して高速化すると効率が向上することが知られている。すなわち、高速かつ高効率のモータと、インバータ、負荷機械を主軸上に一体化してコンパクトに構成する。例えば、ポンプ、モータ、インバータを 1 つのケースに収納したパッケージ製品にまとめ、必要となる流量、圧力

に応じて回転速度を自由に選択し、高効率でかつ低価格な機器が実現できる。

しかし、コンパクトに構成するとわずか数年の軸受寿命が問題になる。さらに、高速化にともなう軸受損失が問題になる。軸受を電磁力で置き換えれば、メンテナンスフリー化するとともに効率が向上する。

申請者は既に、電動機と磁気軸受を磁気的一体化したベアリングレスモータを提案している。このベアリングレスモータは、1 つの回転子がトルクを発生し、さらに、主軸を支持する半径方向の電磁力を同時に発生する。そこで、コンパクトな構成であり、低価格化できる。また、磁気力による主軸支持を

実現し、メンテナンスフリー化することができる。

申請者は1対だけの3相巻線をあらたに加えるだけで電動機と磁気軸受を磁気的一体化するベアリングレスモータを発案した。申請者らの独創的な着想は、

- ・電動機の励磁磁束を利用して磁気軸受機能を実現している。
- ・磁気軸受機能をモータ自体に持たせたために、全軸長をトルク発生に有効に利用している。
- ・モータ本体はきわめて簡単である。
- ・位置制御巻線の電圧、電流は電動機に比較してきわめて小さく、安価なインバータで済む。

さらに、本研究の特色として、永久磁石形電動機などの各種電動機に広く応用できる基本的なアイデアである。大形の発電機から小型電動機などにも応用可能であり、きわめて広い適用範囲を持っている。本研究の結果、国内メーカーの関心が高まり、大学から技術移転が進み国内メーカーの国際競争力が向上する。

従来形の磁気軸受の研究は国内外で以前から多くの研究がされている。また、モータに磁気軸受機能をもたせようとする試みは、申請者の知る範囲で2、3の報告がある。しかし、原理的にも無理があり、実用化の可能性のある方式は従来はなかった。

89年に申請者はベアリングレス回転機の一般化理論を提案した。考え方は単純で、その後、世界各地に広がり、スイス、オーストリア、イギリス、フランス、アメリカ、ブラジルなどの各国を含め、本国のメーカー、大学において研究が進められている。既に、スイスの産学官連携により実用化しており、本国での産学官連携による技術移転が急務である。

2. 研究の目的

既に、その構造、原理、制御方法を明らかにし、過負荷時の加減速などの厳しい条件下においても完全非接触で主軸を支持できることを示した。しかし、人間の背丈ほどの制御装置、ドライブ装置が必要である問題点があった。また、完全に磁気力による非接触を実現すると、モータ部分も大きくなる問題点があった。

交付期間4年間では、完全に非接触で磁気力支持できる小型で簡単な構成のプロトタイプを試作する方法を明らかにする。すなわち、永久磁石機、誘導機の2つのベアリングレスドライブのプロトタイプを製作する方法を明らかにする。プロトタイプはロータ直径50mm程度であり、1mm程度の大きなギャップ長をもち、完全に非接触で磁気力により支持される。回転子を2つ構成し、能動4軸制

御をおこなう。4軸制御を行いながらも、A4雑誌程度の小型コントローラとドライブにより実現する。

3. 研究の方法

図1は本研究で目標とするベアリングレスドライブの構成である。電動機のドライブを完全に独立して構成することにより、商用電源、あるいはインバータによる独立な駆動を行う。独立にモータが運転しても磁気支持系に外乱が生じないように回転機的设计、回転磁界の検出を工夫する。スラスト方向は受動的に安定化して、簡単化する。このような工夫を行う結果、コントローラは2台の3相インバータを運転するだけでよいので汎用の8chのADコンバータ数で十分であり、簡単なボードを適用することができ、コストダウンできる。主軸の軸長もセンサの対向部分が不要であるため短くすることができる。このように簡単化するためには、いかにして回転磁界、主軸の位置を検出すればよいかが問題になる。また、限られた8chのAD変換器に何を入力すべきかが問題になる。さらに、推定した主軸の位置信号に含まれるノイズ、変動を極力低減して安定に非接触するにはいかにコントローラを構成すべきかが問題になる。

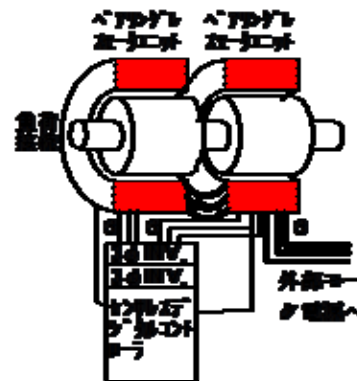


図1 4軸能動制御

4. 研究成果

図2に1ユニット分の誘導機型ベアリングレスモータ制御システム図を示す。本試作機は、2ユニット構成であり、制御システムは2ユニットとも同様である。磁気支持部はベアリングレスモータに取り付けられた変位センサで変位出力 x 、 y を検出し、それを変位指令値 x^* 、 y^* と比較し、このエラーがPIDコントローラに入力される。PIDコントローラはエラーに応じて半径方向力指令値 F_x^* 、 F_y^* を発生する。この半径方向力の指令値は回転磁界に同期させて制御するため、変調を施し磁気支持巻線電流の i_{4a}^* 、 i_{4b}^*

となる。この電流指令値を電流制御し、インバータに入力することで回転子が中心に位置するように制御することができる。

図3は試作したコントローラ基盤、ドライブ回路の写真である。一番下には放熱FINが構成されている。放熱FINには3相電圧形インバータモジュールが2つ取り付けられている。このインバータモジュールの制御を行うのが一番上の基盤とその子亀基盤である。子亀基盤はSHマイクロプロセッサが搭載され、A/D変換などの機能が内蔵されている。このプロセッサにより変位の検出、磁束の検出、電流指令値の発生、オンオフパルスの発生を行っている。さらに、オンオフパルスは2台のインバータに与えられる。

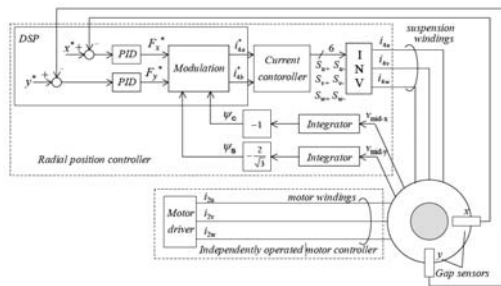


図2 ユニットの構成



図3 コントローラ、ドライブ基盤

図4は製作したシンプルなベアリングレスモータの断面図を示している。このプロジェクトでは、当初外形が四角い形状をしたベアリングレスモータを試作したが、二つのユニットの中心が出にくい問題点があった。このため、一体型のフレームを用いて二つのユニットの中心が出るように工夫している。中心から線対称に構成し、左側をユニット1、右側をユニット2としている。主軸は2本製作し、ギャップ長が0.4mmとなるものと、2mmになるものを製作した。外側にはタッチダウ

ンペアリングとセンサを配置している。

図5は外観写真である。シンプルさを明確にするため、アルミの削りだしでフレームを構成した。また、端子箱をもうけて、見た目がシンプルになるように工夫をしている。

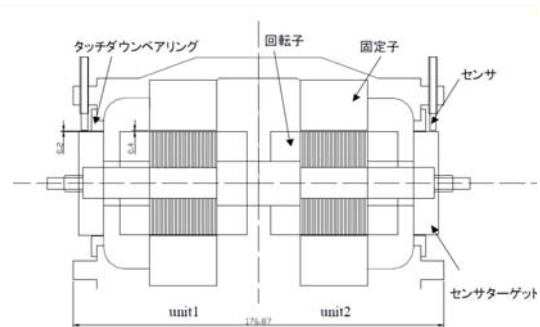


図4 シンプルなベアリングレスモータ

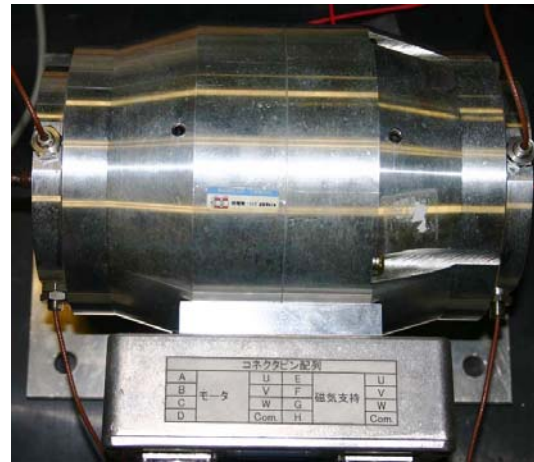


図5 ベアリングレスモータ外観

さらに、サーチコイルを用いて回転子の半径方向の変位を電気的に検出する方式を開発し、センサとしてモータの内部に組み込んだ。このセンサを用いて磁気浮上が可能であることを実験的に確認している。

図6はサーチコイルの配置を示している。まんなかは回転子であり、縮尺は固定子歯部分を強調して拡大して記載している。固定子には多数歯が構成されているが、そのなかで、x、y方向に配置されている歯だけを示している。Lの添え字はサーチコイルの配置方向であり、中心から見て0度方向、 $\pi/2$ 方向、 π 方向、 $3\pi/2$ 方向の4カ所記載されている。回転子の変位すると、変位した方向のサーチコイルのインダクタンスが増加し、その反対方向は減少する。この結果グランド電位から見込んだ中性点電圧が変動する。たとえば、vmid-xの電圧変動は回転子のx方向の変位に比例する。

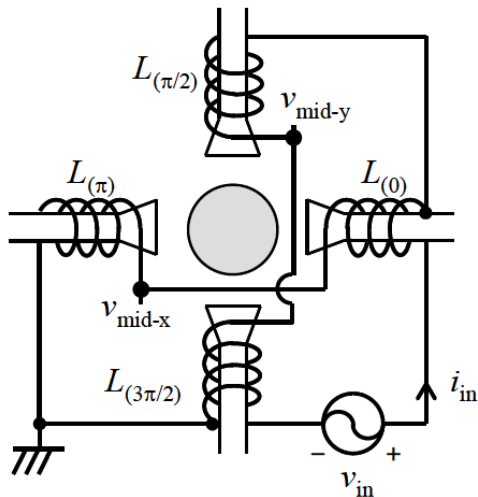


図6 サーチコイル配置

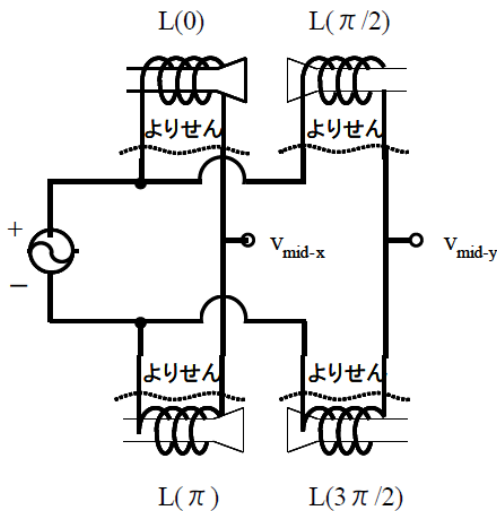


図7 変位信号の抽出

さらに、これらのサーチコイルから電動機内部の回転磁界を検出する。ベアリングレスモータは回転磁界を利用して半径方向力を発生して磁気力によって支持を行う。支持力は回転磁界の大きさに比例し、回転磁界の回転角度位置に依存する。このため、回転磁界を性格に検出する必要がある。回転磁界のx方向の成分を $L(0)$ と $L(\pi)$ のサーチコイルの差分から検出する。差分を得ることによって、磁気支持磁束による干渉を回避することができる。差分信号を積分して回転磁界信号を得るため、積分器の低周波領域での特性が問題になる。積分動作のカットオフ周波数が低いほど、低速の回転磁界を検出できる。しかし、温度ドリフト、オフセットなどの影響を受けやすくなる問題がある。本研究では、汎

用インバータの始動周波数を適切に選択してスイッチオンと同時に浮上開始ができることを明らかにした。

図7は実際のサーチコイルの配線とその基盤での接続方法を示している。各サーチコイルから電圧を直接検出して同相、差動ノイズに対してロバスト化している。

図8は製作したセンサの出力と、市販の変位センサの出力を比較している。ステップ状に回転子の位置を変化したときの追従は差異は観察されないレベルにある。横軸は一まず200ms、縦軸は400マイクロメートルである。このように概略は一致することはできるが、磁気浮上のフィードバックに使用した際に浮上可能でない場合も多々ある。

そこで、図9はサーチコイルから得た信号に基づいてフィードバック制御した際のステップ応答を示している。変位の推定値を用いて安定な磁気浮上が実現しているとともに、良好なステップ応答が得られることが確認できた。

このプロジェクトでは当初3年間弱は誘導機型のベアリングレスモータについて研究開発を行ってきた。最終年度はその成果を永久磁石型のベアリングレスモータにも適用した。

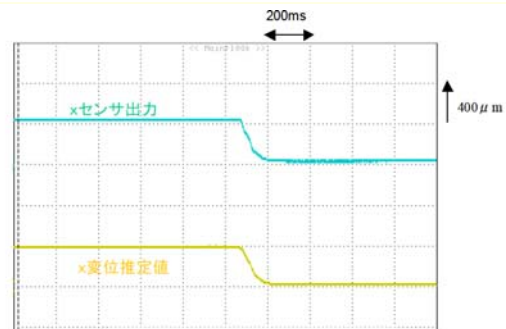


図8 変位推定値出力試験

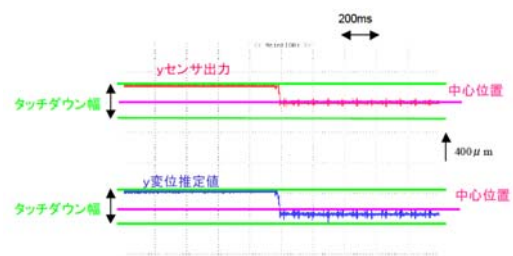


図9 磁気浮上時の波形

図10は永久磁石型ベアリングレスモータの試作機の構成とその浮上、回転ドライブ回路の写真である。能動軸数を4軸から2軸

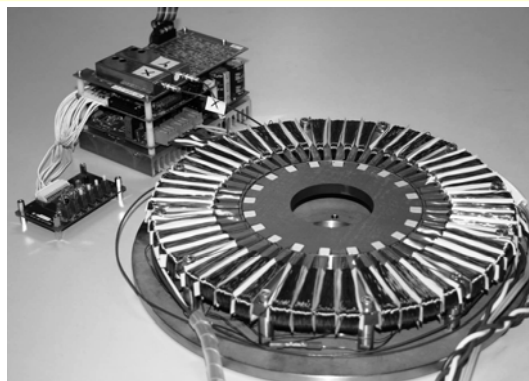


図 1 0 永久磁石型ベアリングレスモータとそのドライブ回路。

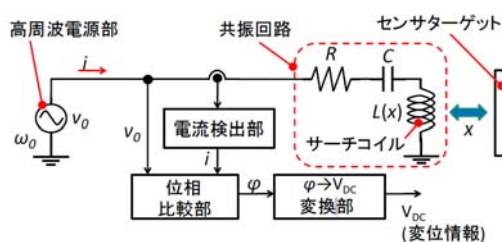


図 1 1 変位検出器の構成

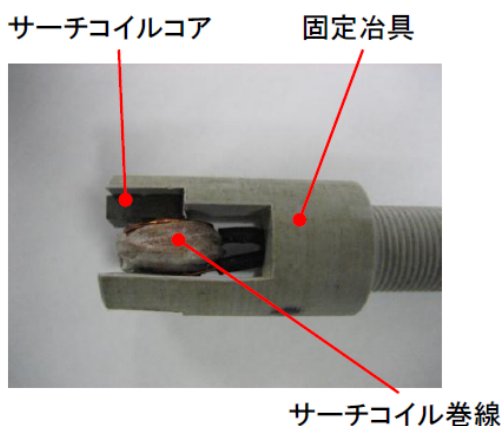


図 1 2 変位検出コア

に変更し、よりシンプルに簡単化している。このため、磁気浮上には3相インバータが一台で済み、図のコントローラドライブでは磁気浮上に加え、モータのトルク制御も可能である。このコントローラはA5サイズであり、当初の目的のA4サイズより小型化することができた。

図 1 1 は非接触で主軸の変位を検出するインダクタンス型の変位検出器の構成を示している。微小な変位によって変化するインダクタンスの量は少ない。そこで、少ないイ

ンダクタンスの変化を検出するためRLC共振回路を構成している。さらに、共振回路の位相を検出することにより検出精度を高める工夫をしている。主軸の変位にほぼ比例して位相が回転する。この位相の回転を直流量で検出するためロジック IC を用いて安価に実現している。共振回路のCRなどの定数は物体を検出する範囲で直線性が高く、かつ位相変化が大きくなるように適切に選択している。

図 1 2 は変位を検出するコアの先端部分の構成を示している。E コアにサーチコイルを巻回している。さらに、固定ジグに固定して機械的に固定する構成としている。E コアのコア材料にはフェライトコアを用い、高周波領域で磁化特性がよい材料を選んでいる。

まとめ

小型で簡単な非接触のベアリングレスドライブを実現するためには、(a)シンプルで小形軽量のベアリングレスモータの開発、(b)変位信号を用いて安定なフィードバック制御の実現、(c)簡単なハードウェアで磁気力による非接触支持を実現する制御装置、などが必要である。

本プロジェクトでは、まず、シンプルなドライブが適用可能な誘導機型ベアリングレスモータを試作した。V/f一定の汎用インバータによって駆動でき、安価でシンプルなドライブを実現できる。さらに、回転機は4軸制御型でシンプルな構造とした。磁気浮上を行うコントローラもシンプルで小形軽量化を実現した。A5サイズ程度の大きさにコントローラを納めることができた。さらに、ベアリングレスモータの浮上実験を進め、磁気浮上して安定に回転することを明らかにした。また、最終年度は永久磁石型の2軸制御のシンプルなベアリングレスモータを試作した。これらの成果を公表するために、学会発表を行った。さらに、モータ技術展などの展示会で試作機の展示を行う予定である。

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 1 1 件)

- ① Hiroya Sugimoto, Kousuke Kamiya, Ryo Nakamura, Junichi Asama, Akira Chiba, Tadashi Fukao and David G. Dorrell, “ Design and Basic Characteristics of Multi- Consequent-pole Bearingless Motor with bi-tooth main poles”, IEEE Transaction on Magnetics 掲載決定 4pages 査読有り

- ② 新井 庸介, 大島政英, 千葉明, 深尾 正
「トロイダルコアを用いた回転子変位
検出法に関する基礎研究」平成 20 年電
気学会全国大会講演論文集 5-203
2008.3.19@福岡工業大学 査読無し
- ③ 神谷幸佑, 杉元紘也, 朝間淳一, 千葉明, 深
尾正「トロイダル巻線構造を採用した多
極コンシクエントポール型ベアリングレ
スモータの設計」日本 AEM 学会誌
vol.17, no.1, 2009 年 3 月 pp.15-20 査
読有り
- ④ 神谷幸佑, 杉元紘也, 中村亮, 朝間淳一、
千葉明、深尾正「トロイダル巻を用い
た多極コンシクエントポール型ベアリ
ングレスモータの軸支持力特性」電気
学会回転機リニアドライブ合同研究会
於田町 2008 年 8 月 7 日 RM-08-39
pp.37-42 査読無し
- ⑤ 神谷幸佑, 杉元 紘也, 朝間淳一, 千葉
明, 深尾正「トロイダル巻線構造を採用
した多極コンシクエントポール型ベア
リングレスモータの設計」電磁力関連の
ダイナミクスシンポジウム講演論文集@
別府 pp.109-114 2008 5 月 査読無し
- ⑥ 益子明宏, 朝間淳一, 千葉明, 深尾正「ワ
イドギャップ用変位センサの提案」平成
20 年度電気学会全国大会 5-204
2008.3.19@福岡工業大学 査読無し
- ⑦ 柳澤弘章, 千葉明、朝間淳一、深尾正、
大島政英、市川修「デジタル出力型変
位センサを用いたベアリングレスモー
タの軸支持系の構成と軸支持特性評価」
電気学会半導体電力変換・リニアドライ
ブ合同研究会資料 SPC-07-132
LD-07-59 2007 pp.53-58 @宮古島
査読無し
- ⑧ 山田貴志、山内義一、千葉明「誘導機型
ベアリングレスモータのギャップ長増
加時の設計と試作結果」電気学会リニア
ドライブ研究会 LD-06-82 pp.11-16
2006.12.8 @金沢大学 査読無し
- ⑨ 山田貴志、千葉明、深尾正、竹本真紹、
大島政英「ギャップ長を増加したベアリ
ングレスモータの試作機構成」平成十八
年度電気学会産業応用部門大会 Y70
@名古屋工業大学 2006.8.21 査読無
し
- ⑩ 千葉明、山内義一、大島政英、深尾正、
竹本真紹「変位・磁束検出型ベアリング
レスモータにおける駆動速度範囲の広
域化」日本 AEM 学会誌 vol.14, no.1,
pp.45-52 2006.3 査読有り
- ⑪ 山内義一、千葉明、大島政英、深尾正、
竹本真紹「変位・磁束検出型ベアリング
レスモータにおける駆動速度範囲の広
域化」日本 AEM 学会電磁力関連のダイ
ナミクスシンポジウム 2005.6@高知工

科大学 pp.279-284 査読無し

[学会発表] (計 2 件)

- ① Hiroya Sugimoto, Kousuke Kamiya, Ryo
Nakamura, Junichi Asama, Akira Chiba,
Tadashi Fukao and David G. Dorrell,
“Design and Basic Characterisitics
of Multi-Consequent-pole Bearingless
Motor with bi-tooth main poles”,
Asian Magnetics Conference 2008 BQ18
p.100, Dec.10-13 2008 Busan, Korea
- ② 山内義一、千葉明、深尾正「ヒステリシ
ス電流制御を用いたベアリングレスモ
ータ変位推定試験」平成 17 年度電気学
会産業応用部門大会 Y-14 @福井大学
8/29-31

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

千葉明(Chiba Akira)
東京理科大学・理工学部・教授

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

大島政英(Ooshima Masahide)
諏訪東京理科大学・システム工学部・准教授
研究者番号：70233103
竹本真紹(Masatsugu Takamoto)
北海道大学・工学部・准教授
研究者番号；80313336