

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01306

研究課題名（和文）三次元運動制御を実現する6自由度円筒リニアモータの創製

研究課題名（英文）Development of Six DOF Tubular Linear Motor for Three Dimensional Motion Control

研究代表者

下野 誠通 (Shimono, Tomoyuki)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：90513292

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、三次元空間における位置と姿勢を制御可能な6自由度円筒リニアモータを新たに創製することを目的とした。独創的なモータ構造を考案し、数理的なモデルを理論モデルを構築した。また、電磁界解析によるシミュレーションおよび試作モータを用いた実験により、その原理検証を行った。その結果、モータ固定子となる六組のコイル部に電流を印加することで発生するロレンツ力の合成により、三つの推力と三つのトルクを発生させることができ、6自由度モータとしての実現可能性があることを確認することができた。このように、独創的モータの設計試作から、モーションシステム応用におけるフィージビリティ検証まで達成することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、研究代表者がこれまでの研究で提案した二自由度モータの設計法を数理的に発展させることで、多自由度リニアモータの三次元設計論の一般化という独創的な学術的知見を得られることが期待される。また得られた成果は、人間支援システム応用を指向したモータ研究という新しい学術分野を拓くことが期待される。開発モータは基本的にリニアガイドやベアリング等の機械要素を必要としないため、機械損低減によるエネルギー効率の向上や、高い制御性の獲得といった効果が得られる。したがって、工作機械や産業用ロボットなど産業機器の革新的な機能向上や、飛躍的な性能改善にも繋がるため、社会的意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：This research aimed at the development of new 6-degrees-of-freedom tubular linear motor which can control the position and the posture in 3-dimensional space. The original structure of the motor was proposed and the mathematical model was created. Then, the proof of concept was achieved by the simulation based on electromagnetic analysis and the experiment on the prototype. As a result, it was confirmed that three thrust forces and three torques can be utilized by integrating Lorentz forces generated at 6 independent coils in the stator part. Finally, the feasibility as actuator for motion system was shown from the obtained results.

研究分野：メカトロニクス

キーワード：電気機器工学 モーションコントロール 制御工学 モータドライブ パワーエレクトロニクス

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、工作機械や産業用ロボットといった産業応用分野のみならず、手術支援ロボットやリハビリ支援ロボットなど医療応用分野においても、モーションシステムの制御性能向上が強く求められてきている。産業応用を主たる目的として発展してきた従来技術では、精密な位置決め性能や外乱抑圧特性の向上に重きが置かれてきたが、医療応用というモーションシステムの新たな適用範囲の拡大に向けては、物体や人など周囲環境との柔軟な接触動作の実現が必要不可欠となり、接触力の制御性能やバックドライバビリティの向上といった新たな技術課題が挙がってきている。さらには、両分野に共通した動向として、複雑ながらも器用な動作を可能とするために、システムの多軸化、多自由度化が進められてきている。

モーションシステムの制御性能を根本的に決定する要素の一つとして、システムを駆動するアクチュエータがあるが、接触力の高精度制御や高いバックドライバビリティの獲得にはコアレスのダイレクトドライブモータを用いることが望ましいとの知見をこれまでの研究で得ている。研究代表者は、前段階の研究において、システムの高制御性能化と多自由度化を同時に達成することを目指し、2自由度円筒リニアモータの試作開発を行った。このダイレクトドライブモータは、永久磁石をシャフトに市松模様に配置した可動子と、二組の三相交流巻線を螺旋状にたすきがけした固定子から成る構造をしている。二組の三相螺旋状巻線によって発生する二つの力の和差により、直動運動と回転運動とを同時かつ独立に実現する駆動原理である。

これまでの2自由度モータに関する研究実績について改めて俯瞰した際、力の和差に基づく駆動原理は実は二次のアダマール行列で表現できることを発見した。研究代表者はこれまでのモーションコントロールに関する研究において、任意の並列多自由度を有するシステムの運動がフーリエ級数展開によって定義されるモード分解行列によって物理的な意味を持った独立な運動要素として分解記述できることを明らかにしている。このような研究過程を経て、並列多自由度システムの運動解析を実現するモード理論を「解析論」から「設計論」として展開することで、革新的な多自由度リニアモータの一般化設計論を確立できるのではないかと、との学術的問いが生じ、本研究の着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、上記の学術的な問いを受けて、モード理論を三次元モータ構造の設計論として昇華させることで、三次元空間での位置と姿勢を同時かつ独立に制御可能な6自由度円筒リニアモータを新たに創製することを目的とすることとした。そして、本目的の達成に向け、6自由度円筒リニアモータの「A. 三次元構造に関する数理学研究」、「B. 設計試作と駆動実験」、「C. 運動制御の実装による有用性実証」という三つの研究項目を遂行し、モーションシステムへの応用可能性までを明らかにすることとした。

3. 研究の方法

前述の研究目的を確実に達成するために、三年間の研究期間において、三つの研究項目を次のように段階的に遂行することとした。

【研究項目A：6自由度リニアモータの三次元構造に関する数理学研究】

多自由度円筒リニアモータ設計に関する数理学研究を行った。本研究で開発するモータでは、三次元空間での位置と姿勢を制御するために、X、Y、Zの三つの方向での推力と、ロール、ピ

ッチ、ヨーの三つの回転方向でのトルクの発生を実現する必要がある。そこで、6つのロレンツ力を発生するための独創的な円筒リニアモータ構造を設計した。そして、このモータ構造に対して有限要素法に基づく電磁界解析を行うことで基本特性を検証し、解析結果をモータ試作の詳細設計に反映させた。また、6自由度リニアモータの運動と力/トルクの関係性を記述する数理モデルを構築した。

【研究項目B：6自由度リニアモータの設計試作と駆動実験】

研究項目Aで得られた知見を基に、実際に6自由度円筒リニアモータの設計試作を行った。6自由度モータのためのドライブシステムを製作し、評価用の6軸力覚センサなどを組み込んだモータ試験装置を用いて試作モータの性能評価実験を行った。

【研究項目C：運動制御の実装による有用性実証】

6自由度リニアモータのためのモーションコントロール研究を実施した。磁束干渉や製作誤差に起因する干渉を抑圧するモード制御アルゴリズムについて検討を深めた。試作モータを用いた評価実験結果から、モーションシステムのためのアクチュエータとしてのフィジビリティについて検証した。

4. 研究成果

まず、これまでの2自由度リニアモータ研究で得られた知見を基に、6つの出力を独立に得るための円筒リニアモータの三次元構造について新たに検討を行った。その結果、6組からなる螺旋状三相交流巻線を有した固定子と、市松模様でセグメント永久磁石を配した固定子からなる、独創的なモータ構造を考案することができた。

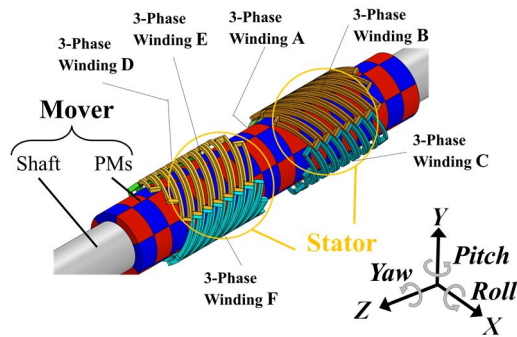


図1 6自由度円筒リニアモータ CAD 図

図1に示すように、モータ試作に向けた基本構造モデルを設計し、このモデルに対して有限要素法に基づく電磁界解析によって

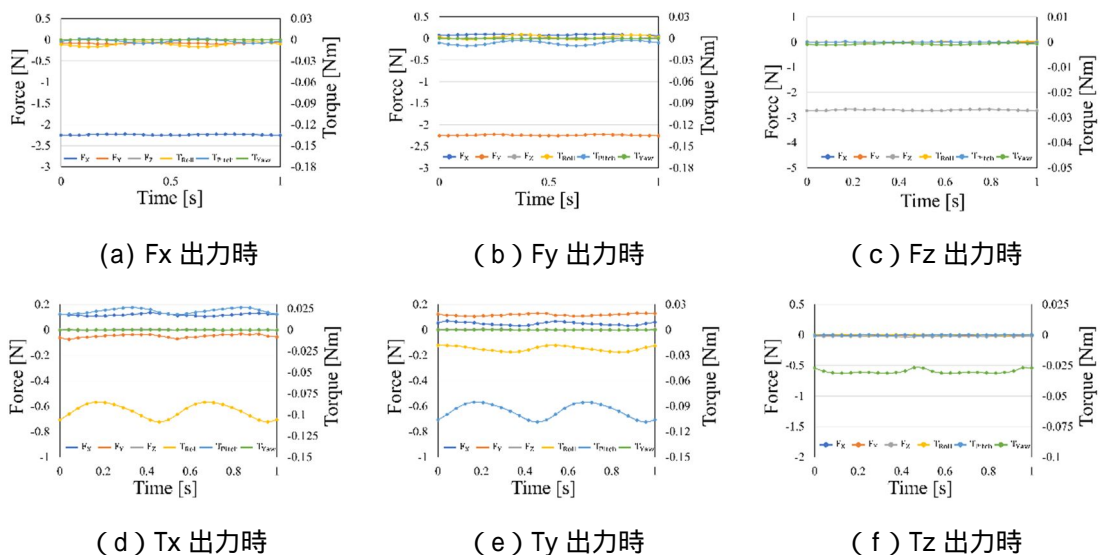
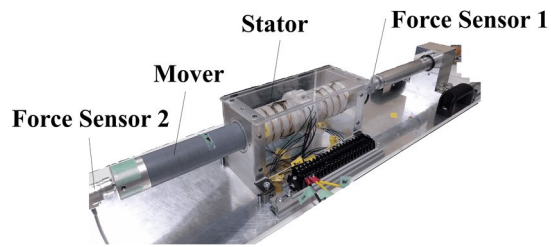


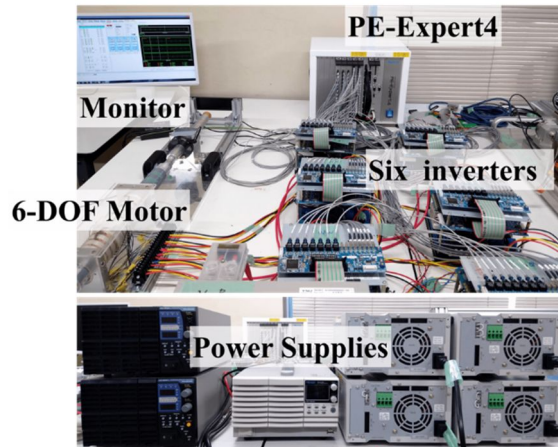
図2 シミュレーション結果

シミュレーション検証を行った。X、Y、Zの3つの方向での推力と、ロール、ピッチ、ヨーの3つの回転方向でのトルクを独立に発生させるように、6組のコイルに電流を印加した際のシミュレーション結果を図2に示す。この結果から、X軸周りのトルク(図2(d))とY軸周りのトルク(図2(e))の発生時には若干の干渉が残るものの、概ね独立に6つの出力が得られることが確認できた。



(a) 6自由度円筒リニアモータ試作機

この結果を受けて、図3(a)に示すように、実際に6自由度円筒リニアモータの試作を行った。6組のコイルを駆動する6つのインバータからなるドライブシステムを製作し、制御プログラムをFPGAに実装した。そして、図3(b)に全体概要を示すように、評価計測用の6軸力覚センサなどを組み込んだ実験環境を構築し、評価実験を行った。



(b) モータ試験装置

図3 実験環境

図4に実験結果を示すように、シミュ

レーション結果と同様に、6つの出力が得られることが確認できた一方で、干渉が一部見られることが課題として残った。特に、X軸周りとY軸周りのトルクの制御においては、可動子と固定子の相対位置に応じた電流制御を検討する必要があるなど、新たな知見を得ることができた。

以上のように、本研究により、独創的な6自由度円筒リニアモータを開発し、そのモーションシステムのアクチュエータとしてのフィジビリティ検証まで達成することができた。

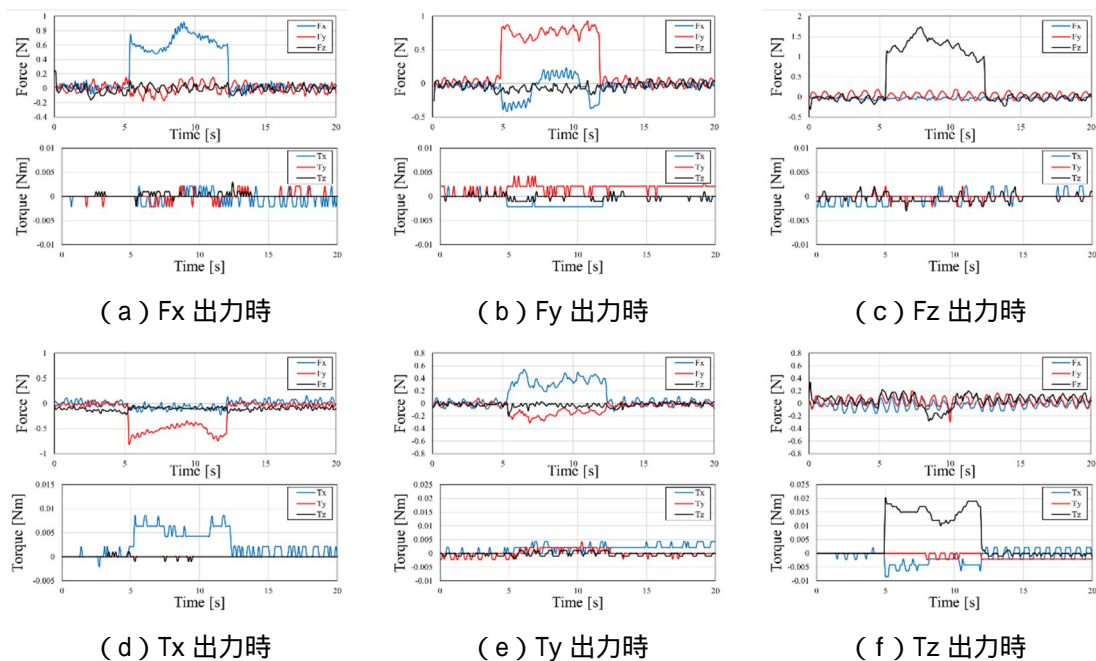


図4 実験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Tomoyuki Shimono
2. 発表標題 Real Haptics and Its Applications to Medical System
3. 学会等名 Dresden International Summer School On Haptics and Cognitive Robotics (HAPCOR) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomoyuki Shimono
2. 発表標題 Damage Analysis of Surgical Drill Bar Based on Force Sensing Technology
3. 学会等名 New Methods of Damage and Failure Analyses of Structural Parts (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 永石和也, 下野誠通
2. 発表標題 円筒形四自由度モータの巻線端部形状による出力影響に関する考察
3. 学会等名 2021年電気学会産業計測制御研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuya Nagaishi and Tomoyuki Shimono
2. 発表標題 Design and Analysis of a 6-DOF Cylindrical Motor
3. 学会等名 The 8th IEEE International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Michihiro Kase, Ngyen Duc Khuong, and Tomoyuki Shimono
2. 発表標題 Fundamental Experiment on Prototype of 6-DOF Cylindrical Motor
3. 学会等名 Joint conference of the 14th edition of France-Japan, 12th Europe-Asia Congress on Mechatronics (Mechatronics 2023) and the 9th Asia International Symposium on Mechatronics (AISM2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

下野研究室 http://www.tsl.ynu.ac.jp/index.html
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	藤本 康孝 (Fujimoto Yasutaka) (60313475)	横浜国立大学・大学院工学研究院・教授 (12701)	
研究分担者	赤津 観 (Akatsu Kan) (90361740)	横浜国立大学・大学院工学研究院・教授 (12701)	
研究分担者	小原 秀嶺 (Obara Hidemine) (50772787)	横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授 (12701)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------