

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：13901  
研究種目：研究活動スタート支援  
研究期間：2021～2022  
課題番号：21K20404  
研究課題名（和文）多自由度アクチュエータを用いた眼球マスタスレーブシステムによる遠隔操作の高度化  
  
研究課題名（英文）Teleoperation using eye master-slave system with multi-degree-of-freedom actuator  
  
研究代表者  
部矢 明（Heya, Akira）  
  
名古屋大学・工学研究科・准教授  
  
研究者番号：80911297  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、視覚システムへの応用を目的として、人の眼球のように様々な方向に回転可能なアクチュエータである多自由度アクチュエータに着目した。眼球の高速な運動を再現するには、回転部の慣性モーメントを極力小さく設計する必要がある。また、2眼駆動機構を構築するためには、その構造と制御装置においても小型で構成可能であることが求められる。そのため、簡素な構造および制御装置で多自由度回転可能な多自由度アクチュエータの磁気構造・動作原理を提案した。そして、制御理論・動的モデルを構築し、動作可能であることを実証した。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

多自由度アクチュエータは1台で様々な多自由度運動を生成できる利点を持つ一方、構造が複雑かつ制御装置が大型なため適用先は限定されていた。本研究において提案した多自由度アクチュエータは従来と比較して最も簡素な構造を有しており、制御装置も小型であることから、産業界等への多自由度アクチュエータの適用範囲を拡大するものである。また、多自由度アクチュエータの新たな設計論を提示したことに学術的意義があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, I focused on a multi-degree-of-freedom (multi-DOF) actuator that can rotate in various directions like the human eyeball, for application to vision systems. In order to reproduce the high-speed motion of the eyeball, the moment of inertia of the rotating part must be designed as small as possible. In addition, to construct a binocular driving mechanism, the structure and control device must be compact and configurable. Therefore, I proposed a magnetic structure and operating principle of a multi-DOF actuator that generates multi-DOF rotation with a simple structure and control device. The control theory and dynamic model are developed, and it is demonstrated that the actuator can be operated.

研究分野：アクチュエータ

キーワード：アクチュエータ 多自由度アクチュエータ モータ 多自由度機構

### 1. 研究開始当初の背景

微細加工・組立、遠隔手術や災害救助をはじめとして、ロボットの遠隔操作により人やモノを含む未知環境内で協働および複雑なタスクを実行するためには、高い空間認識能力が求められる。このような環境下でロボットを遠隔操作して精確かつ緻密な作業を実行するためには、認識範囲を広く持つとともに、奥行き方向の空間分解能が重要となる。従来のロボットの視覚システムでは、単眼もしくは互いに固定された2眼カメラが用いられている。しかし、これらはカメラが固定されているため、立体視における奥行き方向の空間分解能を高めることが難しい。一方、人は2つの眼球を相対的に動かすことで認識範囲を拡大し、2眼の視線の角度を調整して奥行き方向に高い分解能を得ている。これに着目し、ロボットの遠隔操作時に、人が自身の眼球と協調動作する2眼駆動視覚システムの着想を得た。このシステムは以下の利点を有する。

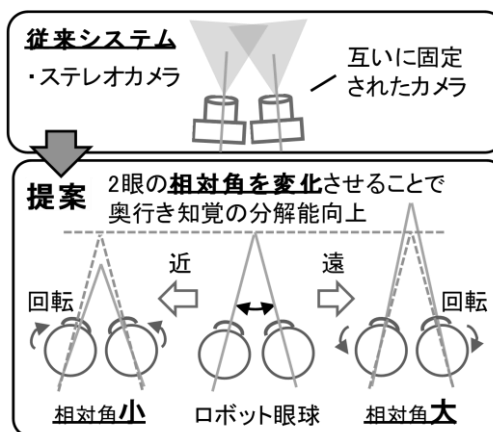


Fig. 1 2眼駆動視覚システム

- ・ステレオ視による奥行き知覚と2眼相対運動による空間解像度の向上
- ・広範囲観察と高精度注視を両立しつつ、高速な視標切替とスムーズな追従が可能
- ・注視・視標追従時の外乱振動による振れをアクティブに補正可能

2眼駆動視覚は多数の利点を有するが、その駆動源となる多自由度機構は複数のモータと機械要素を組み合わせることで構成される。そのため大型化が避けられず、機械要素のガタと可動部重量増加により人の眼球と同等の運動性能を達成することは困難であった。

そこで筆者は、1台で多自由度動作を生成可能かつ、ダイレクトドライブで駆動する眼球アクチュエータを提案した (Fig. 2)。本アクチュエータは、3つの電磁アクチュエータの磁気回路を集積回路のように小球体積内に集積化した3次元の新しい磁気回路を持つ。しかし、人の眼球と同サイズで2眼駆動視覚システムを構築するためには、さらなるアクチュエータの小型化と、そのための構造簡素化が必要となる。

### 2. 研究の目的

本研究では、2眼駆動視覚システムへ適用するための、小型かつ簡素構造を有する2自由度アクチュエータを開発する。新たな動作原理を提案し、それに基づいた磁気構造を設計する。また、磁場解析によりトルク特性を明らかにするとともに、動的モデルを構築し、動作性能を検証する。

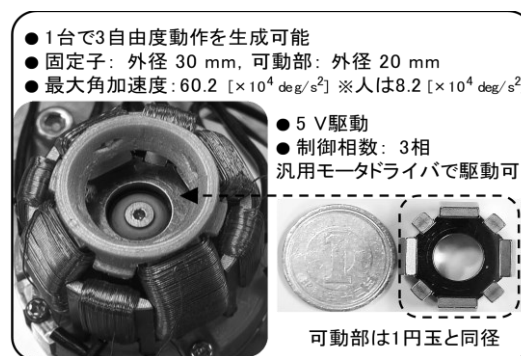


Fig. 2 眼球アクチュエータ

### 3. 研究の方法

人の眼球の高速な運動を再現するため、アクチュエータ可動部の慣性モーメントはできる限り小さく設計できることが望ましい。そこで、本研究ではボイスコイルモータの構造をベースとし、2自由度回転化が可能であるかを検討した。また、2軸まわり回転において各軸をそれぞれ独立に制御する電磁駆動構造においては、2コイルが最小のコイル数と考えられるため、アクチュエータは2コイルのみ有することとした。以上の条件から、評価モデルを設計し、3次元有限要素法解析を用いた磁場解析により通電時の静トルク特性を算出する。また、運動方程式を導出し、動的な挙動を確認するとともに、3次元有限要素法を用いた動解析と結果を比較することでその妥当性を検証する。

#### 4. 研究成果

提案する 2 コイル 2 自由度ボイスコイルアクチュエータを Fig. 3 に示す。本アクチュエータのロータは直交して巻かれた 2 コイルで構成される。固定子は 2 個の半球状永久磁石、インナーヨーク、球殻アウターヨーク ( $S\Phi 21\text{ mm}$ ) で構成される。永久磁石から発生する磁束はロータである 2 コイルを通過し、アウターヨークを介して閉じた磁気回路を構成する。なお、カメラモジュールをロータに取り付け、可動子が回転することで視点変更が可能な機構としている。可動子は Fig. 4 に示すジンバル機構によって 2 自由度回転が可能に支持されている。本アクチュエータの動作原理を Fig. 5 に示す。X コイルを通電時、永久磁石から発生する磁束の方向とコイル中を流れる電流の方向から、X 軸まわりのトルクが発生する。同様に、Y 軸コイルの通電時は Y 軸まわりのトルクが発生する。この動作原理から、2 軸まわりに独立にトルクを発生可能である。

3 次元有限要素法を用いた磁場解析の結果を Fig. 6 に示す。代表として、定電流印可時の X 軸まわりトルク定数のみ示している。結果から、原点から離れるほどトルク定数が小さくなり、姿勢によって変動していることがわかる。これは、コイルが回転して永久磁石の端に近づくほど磁束密度が小さくなるのが原因である。そのため、動的モデルにおいては姿勢変化時の逐次的なトルク定数変化の考慮が必要である。

オイラー角で姿勢を表現し、2 自由度回転運動のラグランジュ運動方程式を導出した。本アクチュエータの入力は電圧であるため、回路方程式を解くことで電流を計算し、電流とトルクの関係は Fig. 6 に示したトルク定数マップを利用した。回路方程式中のインダクタンスは有限要素法解析から求め、逆起電圧定数はトルク定数と同じとした。本手法の妥当性を検証するため、3 次元有限要素法を用いた磁場解析と運動方程式の連成解析により求めた動的挙動と比較した。なお、入力として  $0.1\text{ V}$  振幅、 $20\text{ Hz}$  の交流電圧を与えた。代表として 1 軸回転時の比較結果を Fig. 7 に示す。赤線が本手法、青破線が有限要素法解析の結果であり、緑線はトルク定数を一定（姿勢全域での平均値）とした場合の結果である。本手法と有限要素法解析の結果の一致から、妥当性が確認できた。また、トルク定数を一定とした場合、差異が大きくなることから、トルク定数の姿勢変化を考慮した計算の有効性が確認できる。Fig. 8 に示すように試作機を製作しており、実機での特性についても実験予定である。

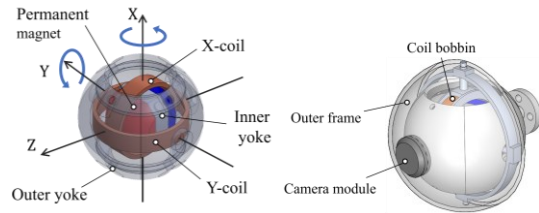


Fig. 3 2 コイル 2 自由度ボイスコイルアクチュエータ

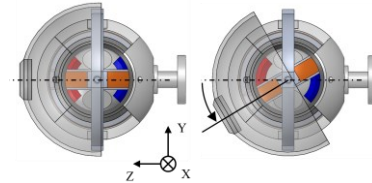


Fig. 4 支持機構

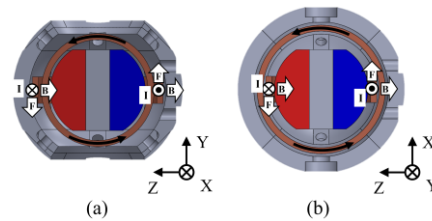


Fig. 5 動作原理

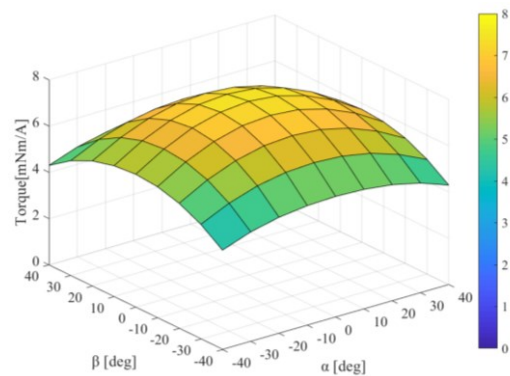


Fig. 6 トルク解析結果

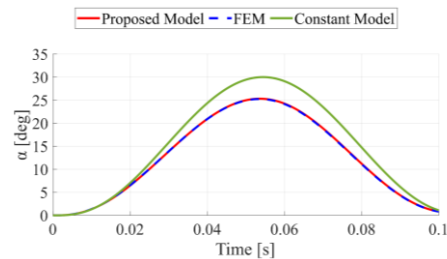


Fig. 7 動作解析結果



Fig. 8 試作機

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Heya Akira, Hirata Katsuhiro	4. 巻 11
2. 論文標題 Design and Analysis of Five-Degree-of-Freedom Oscillatory Actuator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 20 ~ 26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjia.20004730	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 HEYA Akira, HIRATA Katsuhiro	4. 巻 29
2. 論文標題 Design and Analysis of a Six-Degree-of-Freedom Oscillatory Actuator Using Lorentz Force	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics	6. 最初と最後の頁 538 ~ 543
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14243/jsaem.29.538	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Akira Heya, Katsuhiro Hirata
2. 発表標題 Modeling and Dynamic Analysis of Two-Degree-of-Freedom Voice Coil Actuator Driven by Three-Phase
3. 学会等名 23rd International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hirotsugu Fusayasu, Akira Heya, Katsuhiro Hirata
2. 発表標題 Modeling and Dynamic Analysis of Three-Degree-of-Freedom Spherical Actuator under Deep Reinforcement Learning Control
3. 学会等名 23rd International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akira Heya, Katsuhiko Hirata, Noboru Niguchi, Yuki Anraku
2. 発表標題 Analysis of a Magnetic Lead Screw Actuator with Step Skew Structure
3. 学会等名 2021 International Conference on Electrical Machines and Systems (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akira Heya, Katsuhiko Hirata
2. 発表標題 Three-Degree-of-Freedom Voice Coil Actuator Driven by Four-Phase
3. 学会等名 20th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 部矢明, 平田勝弘
2. 発表標題 4相駆動3自由度球面アクチュエータの運動制御
3. 学会等名 第30回MAGDAコンファレンスin広島
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

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
---------	---------