

〈一般研究課題〉 3次元振動アクチュエータにより駆動する
高機能力覚提示グローブの開発

助成研究者 名古屋大学 部矢 明



3次元振動アクチュエータにより駆動する 高機能力覚提示グローブの開発

部矢 明
(名古屋大学)

Development of a High-Performance Haptic Feedback Glove Driven by a Three-Dimensional Vibration Actuator

Akira Heya
(Nagoya University)

Abstract :

In recent years, the development of haptic feedback gloves has been pursued for XR content and remote operation of mechanical systems. However, conventional devices are unable to present three-dimensional (3D) forces independently to each finger. This is because presenting 3D force to each finger requires the combination of at least three actuators per finger, resulting in large size and heavy weight. The increase in size and weight significantly affects the user's sensory experience and available usage time in force feedback, making it a critical issue. To address this, the authors focus on the multi-axis capability of vibration devices. While previous studies have proposed multi-axis vibration structures using multiple vibration motors, such configurations inherently lead to bulkiness. Therefore, the authors proposed a novel three-dimensional vibration actuator capable of generating vibrations in arbitrary directions with a single unit. The actuators for haptic feedback gloves based on the principle are developing. However, the generated vibration was weak, making haptic presentation difficult. Furthermore, the driving mechanism suffered from cross-axis interference, where vibrations unintentionally occurred in directions other than the intended axis. To overcome these issues, this study proposes a new three-dimensional vibration actuator specifically designed for haptic feedback gloves. First, the basic structure and driving principle of the proposed actuator are presented. Then, its static thrust characteristics are analyzed using 3D finite element method, and a dynamic model is

constructed based on the equation of motion to simulate vibration behavior. Finally, a prototype is fabricated, and its static thrust and frequency characteristics are measured and reported.

1. はじめに

XR (VR・AR・MR) コンテンツや機械システムの遠隔操作においては、視覚情報に加えて力覚情報を加えることで体験の質・操作効率の向上が期待できる。ユーザの動作に応じて振動・圧力などにより力覚を提示する技術をフォースフィードバックと呼ぶが、近年ではユーザが手に装着してフォースフィードバックを行う力覚提示グローブの開発が盛んに行われている。実用化例として、指先端に1軸振動モータを取り付けた力覚提示グローブであるPrime X (MANUS社)・SenseGlove Nova 2 (SenseGlove社), Contact Glove 2(Diver-X社), 空圧力によって力覚提示を行うHaptX Gloves DK2(HaptX社)などが挙げられる。しかし、従来デバイスは各指に対して独立に3次元力を提示することは不可能である。その理由として、3次元力を各指に対して提示するためには1本の指に対して3個以上のアクチュエータを組み合わせる必要があり、大型かつ高重量となってしまうことが挙げられる。サイズ・重量の増加はユーザのフォースフィードバックにおける感覚や使用可能時間に大きく影響するため、重要な課題となる。

そこで振動デバイスの多軸化に着目した。多軸振動デバイスの先行研究としては、複数の振動モータを組み合わせた構造[1][2]が存在する。しかし、複数台の振動モータを組み合わせた場合にも大型化の問題は避けられない。そのため著者は1台であらゆる方向へ振動可能な3次元振動アクチュエータを提案している[3]。従来の振動モータが2次元平面上で磁気回路を構成するのに対して、本アクチュエータは3次元磁気回路を構成し、1台で3次元振動を実現している。この原理を応用して力覚提示グローブ用アクチュエータとして提案したのが文献[4]のアクチュエータである。円筒型の中空形状を有し、アクチュエータ中心に指を入れることで振動が伝達する構成となっている。しかし、被験者実験を実施したところ、振動が弱く、力覚提示は困難であった。また、任意軸方向へ振動させる際に他の軸方向に振動が生まれる他軸干渉が起こる駆動原理となっていたことも大きな課題であった。そのため本研究では、力覚提示グローブのための新たな3次元振動アクチュエータを提案する。まず、提案アクチュエータの基本構造および動作原理を示す。また、アクチュエータの静推力特性を3次元有限要素法解析によって求め、運動方程式を用いた動的モデルを構築し、振動シミュレーションによる挙動予測を実施した。さらに、試作機を製作し、静推力および周波数特性の実測を行ったため報告する。

2. 力覚提示グローブのための指輪型3次元振動アクチュエータ

本研究において提案する指輪型3次元振動アクチュエータの基本構造を図1に示す。内側が固定子となっており、指を通すため中空構造となっている。永久磁石小片を周方向に9個配置しており、ヨークおよび非磁性部品によって構成される。可動子はその外側に配置されており、6個のコイルおよびヨークから構成される。可動子と固定子間にはコイルばねを配置しており、コイルばねは伸縮方向の剛性だけでなく横剛性も持つため、3自由度運動時にもエアギャップが保たれる設計となっている。

各軸方向の駆動原理を図2に示す。3つのxy駆動用コイルの電流の大きさ・方向を調整することで、各部で生じる電磁石と永久磁石との磁気吸引力・反発力を合成し、x・y軸方向に独立駆動が可

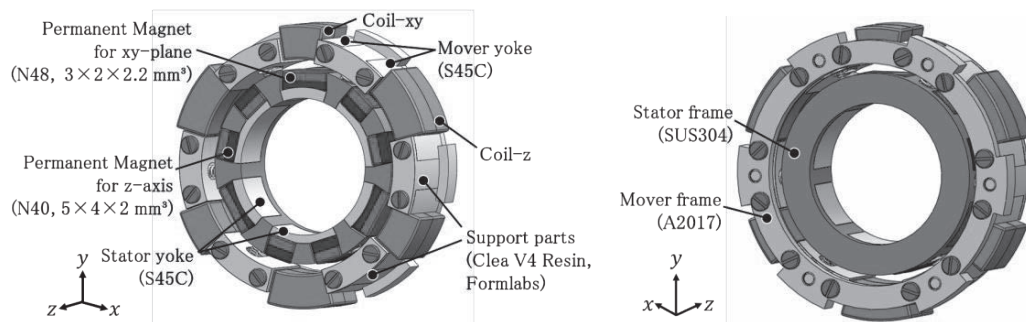


図1 基本構造

能である。z駆動用コイルを通電した際にも同様にz軸方向に独立駆動が可能であり、xy・z駆動用コイルを同時通電することで、各方向推力を合成し、3次元振動が実現される。このとき、各軸に独立駆動可能であることから、他軸干渉のない振動制御が期待できる。

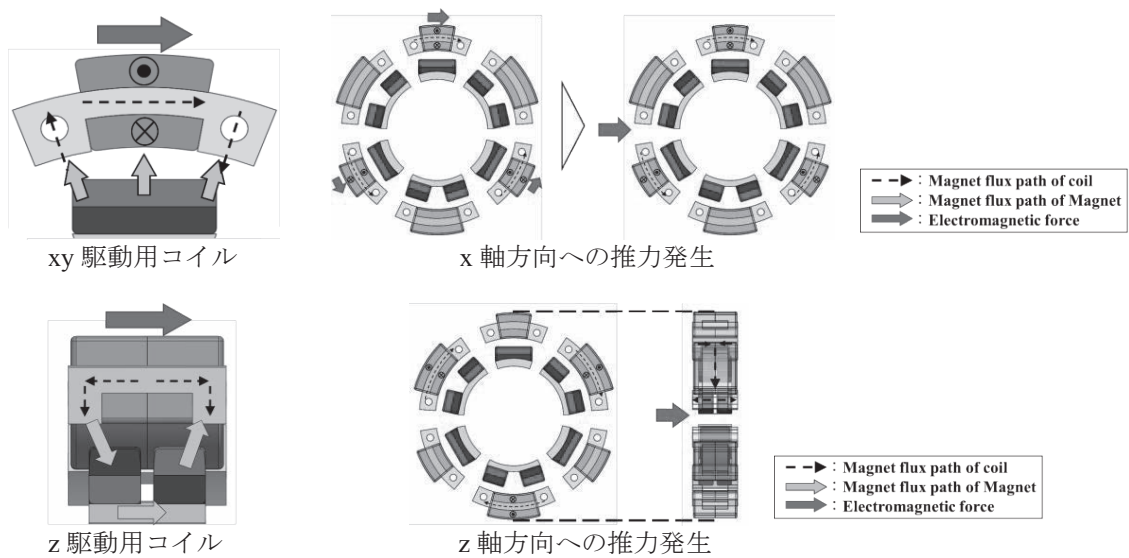


図2 動作原理

試作機の外観を図3に示す。可動子外径は28 mm，固定子外径は19.2 mm，厚みは5.5 mmである。全体質量は12.4 g，可動子質量は5.5 g，コイルばねのばね定数は1.079 N/mmでSUS304WPB製である。固定子・可動子の軟磁性体としてはS45Cを利用し，xy駆動用磁石はN40 (NeoMag社)，z駆

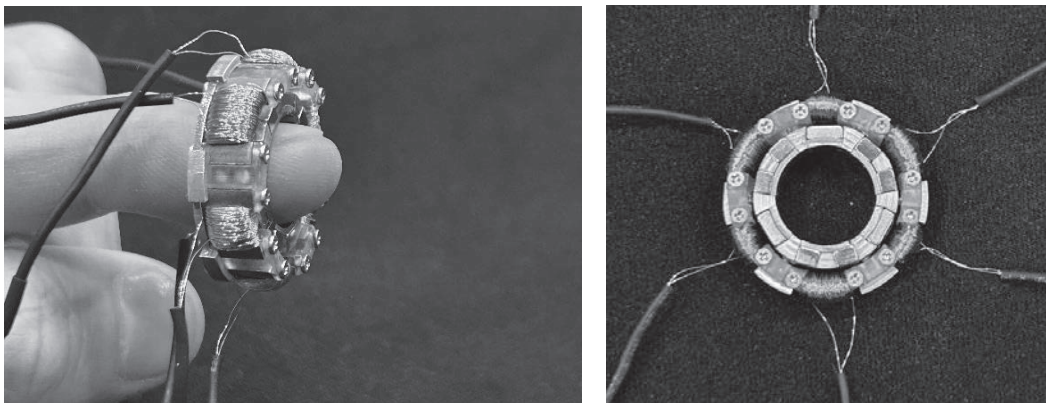


図3 試作機

動用磁石はN48 (NeoMag社) を使用した。

3. 指輪型3次元振動アクチュエータの基本特性

3.1 静推力特性

3次元有限要素法解析により0.15 A印加時(電流密度20 A/mm²)での推力特性を解析した。各軸方向に推力が発生する電流パターンで電流を印加した結果として、x方向に0.17 N、y方向に0.15 N、z方向に0.07 Nの推力が独立に得られた。他軸方向の推力が0 Nであったことから、他軸干渉が生じないことを確認した。解析時の磁束密度分布の一例を図4に示す。なお、従来モデルと比較して、3倍以上の推力向上を達成している。

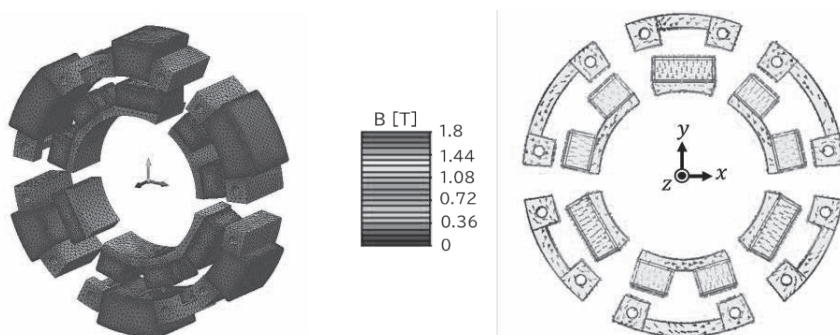


図4 磁束密度分布解析結果(電流パターン:x軸方向推力発生)

3.2 動的モデルと振動シミュレーション

3次元有限要素法解析で得られた推力の結果から推力定数テーブルを作成し、任意電流を与えた際に発生する推力を求め、運動方程式の入力として与えることで時刻歴応答を算出するモデルを構築した。なお、3つのxy駆動コイルに与える電流の配分は2相3相変換によって算出している。一例として、xy平面上で円軌道を描く電流指令を与えた際の可動子挙動を図5に示す。結果から、円軌道を描いていることが確認できる。また、1~300 Hzまでの50秒間のチャープ信号を入力として注入し、周波数特性を求めた。代表として、x軸方向の周波数特性を4章にて後述する。

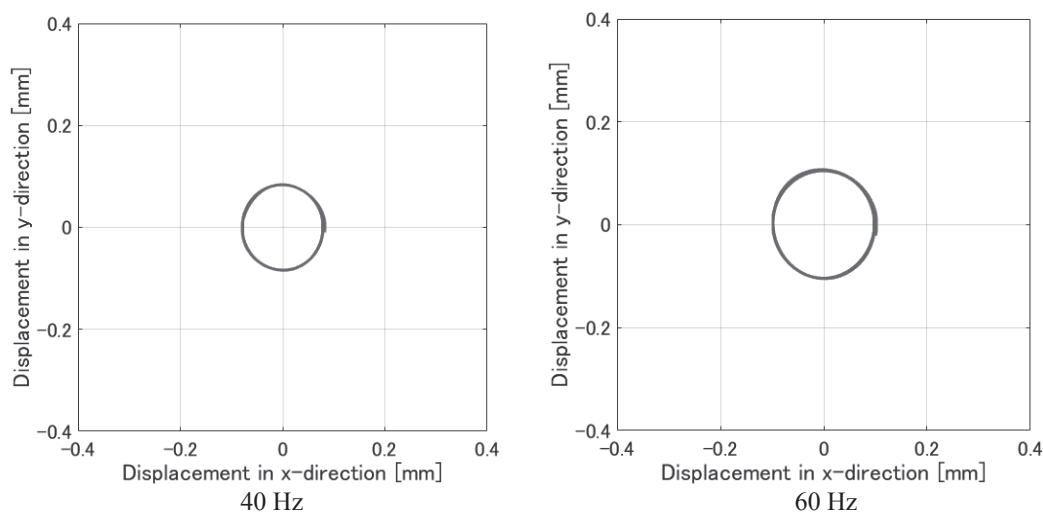


図5 円軌道電流パターンでの可動子挙動

4. 実機検証

静推力特性の実験環境を図6に示す。ロードセルと可動子を接続し、電流印加時と非印加時での発生力を比較し、x方向に0.1 N、y方向に0.2 N、z方向に0.04 Nの発生を確認した。組立誤差の影響により解析結果との差異はみられるが、駆動原理の妥当性を確認できた。

周波数特性の測定環境を図7に示す。チャープ信号注入時の可動子変位はレーザ距離計(LB-080, キーエンス社)を利用して測定した。結果の一例として、x軸方向の周波数特性を図8に示す。解析・実験結果の比較を示しており、両者の共振点が定性的に一致していることを確認した。

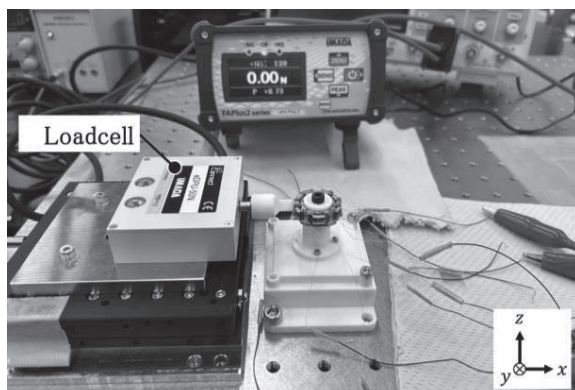


図6 静推力特性の測定環境

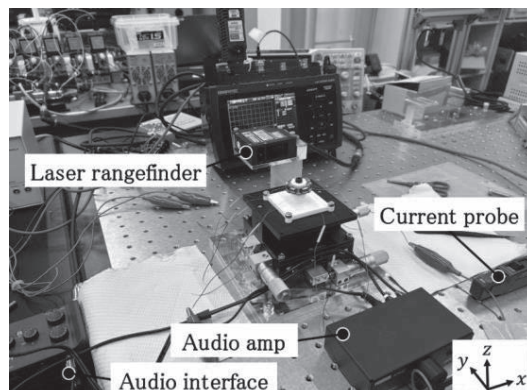


図7 周波数特性の測定環境

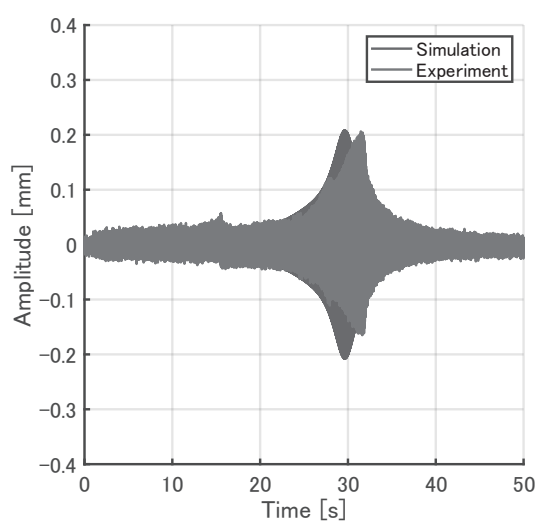
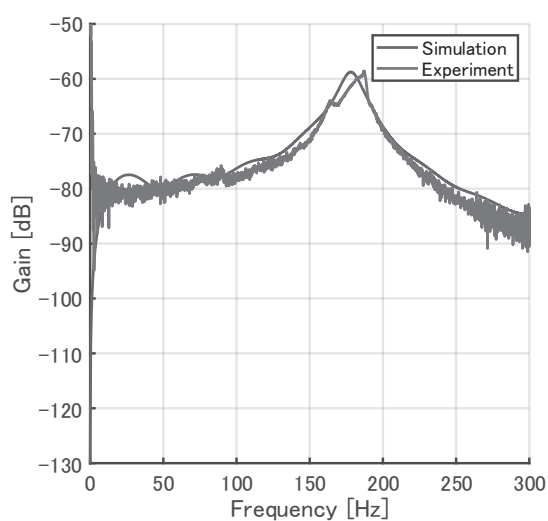


図8 周波数特性測定結果(x軸)

5. まとめ

本研究では、力覚提示グローブのための新しい3次元振動アクチュエータを提案した。3次元有限要素法解析および数値計算から原理的に駆動可能であることを検証するとともに、製作した試作機によって実験的に性能検証を実施した。今後は、被験者実験および提案アクチュエータを利用した力覚提示グローブを開発する。

参考文献

- [1] H. Kim, H. Yi, H. Lee, and W. Lee, “HapCube: A Wearable Tactile Device to Provide Tangential and Normal Pseudo-Force Feedback on a Fingertip”, Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2018.
- [2] S. Kim, W. Lee and J. Park, “A 2-DOF Impact Actuator for Haptic Application”, Actuators, no. 11(3), 2022.
- [3] Akira Heya, Ryosuke Nakamura, and Katsuhiko Hirata, “Development of Compact Three Degrees of Freedom Oscillatory Actuator”, Journal of Robotics and Mechatronics, vol.35, no. 5, pp. 1312-1320, 2023.
- [4] Yujiro Dan, Akira Heya, and Tsuyoshi Inoue, “Force Generation Method of a Novel Three-Degree-of-Freedom Electromagnetic Actuator with Finger Ring Structure”, Proceedings of the 2023 IEEE International Magnetics Conference, KOA-07, 2023.