

2021 年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所 属 機 関	名古屋大学 大学院工学研究科 機械システム工学専攻
職 位 または 役 職	助教
氏 名	部 矢 明

1. 研究題目

超小型 3 次元力覚提示アクチュエータの研究開発

2. 研究目的

新しい情報伝達方法として、振動により空間上の様々な方向へ人に力を伝える 3 次元力覚提示が注目されている。その応用技術は学習・行動支援、コミュニケーション、エンターテインメントをはじめとして様々な分野への貢献が期待できる。しかし、既存の技術では、携帯性に優れた実用的な 3 次元力覚提示装置の実現は困難な状況にある。例として、Taptic Engine(日本電産社)をはじめとした 1 自由度振動アクチュエータを 3 つ組み合わせた場合、大型化と重量の増加が課題となる。また、各アクチュエータの振動中心を一致させることができないため、原点から離れた位置での並進振動によりトルクが発生し、正確な力提示が困難である。

そこで報告者は、1 可動子のみで空間上の任意方向に振動を生成可能な 3 自由度振動アクチュエータ(3D-LOA)を提案した。3D-LOA は汎用モータドライバで駆動可能であり、電磁力によるダイレクトドライブのため高応答性を有する。また、1 可動子のみを 3 自由度振動させるため、振動中心のずれはない。しかし、可動子に複雑な 3 自由度支持機構が必要となり、大型化、重量の増加と摩擦損失が課題となっていた。

本研究では、新しい 3D-LOA 構造の提案により支持機構の簡略化を実現する。そして、磁気回路部と弾性ばねによる無摺動 3 自由度支持機構の一体化により 3 次元力覚提示アクチュエータの大幅な小型化を実現する。試作検証により提案アクチュエータの駆動特性を評価するとともに、3 次元力覚提示性能を評価する。

3. 研究内容及び成果

①新しい 3D-LOA の提案

従来 3D-LOA は、その巻線構造から、固定子磁極・可動子間に機械ばねを配置することが困難であった(図 1)。また、可動子が外側に配置されており、中心から離れた位置にあるため、支持機構において回転拘束が必要であった。そのため、磁気回路の外側に支持機構を設ける必要があり、大型化と重量の増加が避けられなかった。

そこで本研究では、可動子が固定子の内側に配置され、支持機構を内包可能な新しい 3 次元磁気構造を持つ 3D-LOA(図 2)を提案した。図 3 に示す提案構造により、可動子質量の中心からの距離を縮めてトルクの影響を抑制し、回転拘束が不要な構造とした。可動子は 6 個の円筒型永久磁石とヨーク、固定子は 6 個のコイルおよび磁極とバックヨークから構成される。そして、機械ばねによる無摺動 3 自由度支持機構を磁気回路に内包し、全体体積 64 分の 1 の圧倒的な小型化を実現した。機械ばねとしてはコイルばねを採用し、コイルばねが縦・横方向ともに弾性を有することを利用して原点安定系の空間的な剛性を持たせた。また、1 自由度駆動につき 1 相を制御する動作原理(図 4)により、汎用モータドライバ 3 個のみで 3 自由度駆動を可能とした。

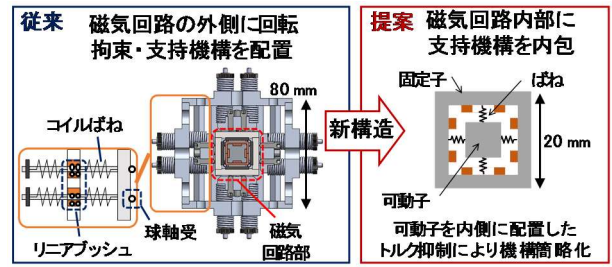


図 1 従来構造と提案構造の比較

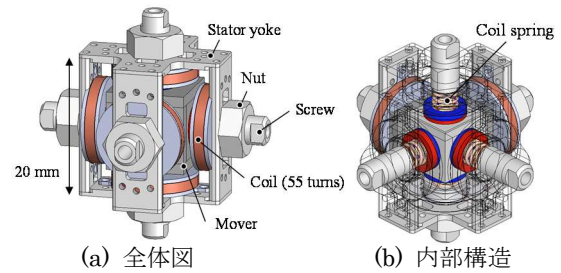


図 2 提案 3D-LOA

永久磁石から発生する磁束は 3 次元の閉じた磁気回路を構成
機械ばねを内包可能な磁極・磁石形状の採用

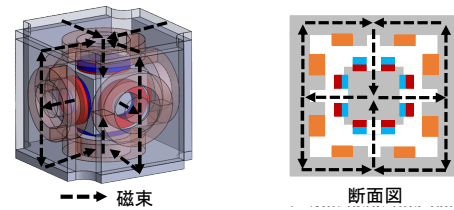


図 3 新しい 3 次元磁気構造

②試作機による動作検証

提案アクチュエータの試作機を図 5 に示す。指先で把持可能なサイズとして、 $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}$ に収まるよう設計した。全体質量は 29.8 g 、可動子質量は 9.1 g 、各軸方向へのストロークは $\pm 0.5 \text{ mm}$ である。推力定数は各軸方向に約 0.5 N/A であった。なお、コイルばねの圧縮量を調整する全ねじとナットを 6 面に配置しており、可動子位置の微調整を可能としている。

製作した試作機を用いて、力覚提示のための非対称振動の検証実験を行った。本実験においては、まず目標とする偏加速度波形を定め、導出したアクチュエータの数学モデルから事前に入力電圧を求めた。実験においては、3 軸方向にレーザ距離計(LK-G35, KEYENCE 社)を配置し、可動子の変位を測定した。結果の一例として、z 軸方向に偏加速度駆動させた場合の実験結果を図 6 に示す。結果から、z 軸方向にのみ偏加速度駆動していることがわかる。なお、x 軸および y 軸方向に微小な振動が生まれているが、これは支持機構における可動子姿勢の微小な傾きが原因と考えられる。しかし、この干渉は小さく、非対称振動となっていないことから知覚への影響は小さい。

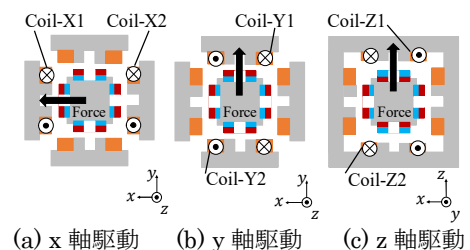


図 4 動作原理

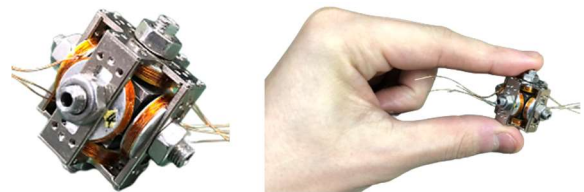


図 5 試作機

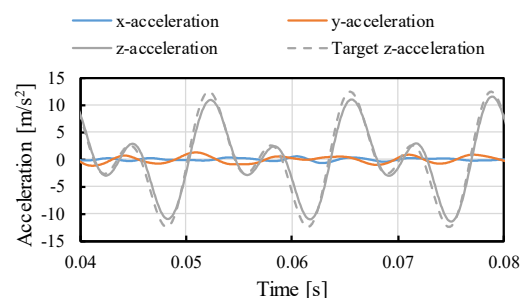


図 6 偏加速度駆動の実験結果

4. 今後の研究の見通し

● 3次元力覚提示アクチュエータのウェアラブル化への挑戦

提案した 3D-LOA は従来構造と比較して大幅な小型化を達成した一方、6 個の永久磁石と 6 個のコイルを立方体 6 面に配置する必要があり、指で把持することを前提とした構造であった。そのため、提示自由度は片手につき 3 自由度となり、提示自由度の大幅な拡張は困難である。一方、近年のメタバース・VR 技術においては多様な力覚情報の提示が求められており、自由度拡張の需要がある。

そこで今後は、3D-LOA の扁平化により、ウェアラブル化することで多数の 3D-LOA を身体へ装着可能とし、大幅な提示自由度の拡張を目指す(図 7)。その実現のために、1 平面に配置された 2 個の永久磁石と 3 個のコイルのみで 3 自由度並進運動を生み出す新しい磁気構造・駆動原理を開発する(図 8)。



図 7 提示自由度の拡張を目指した構造検討

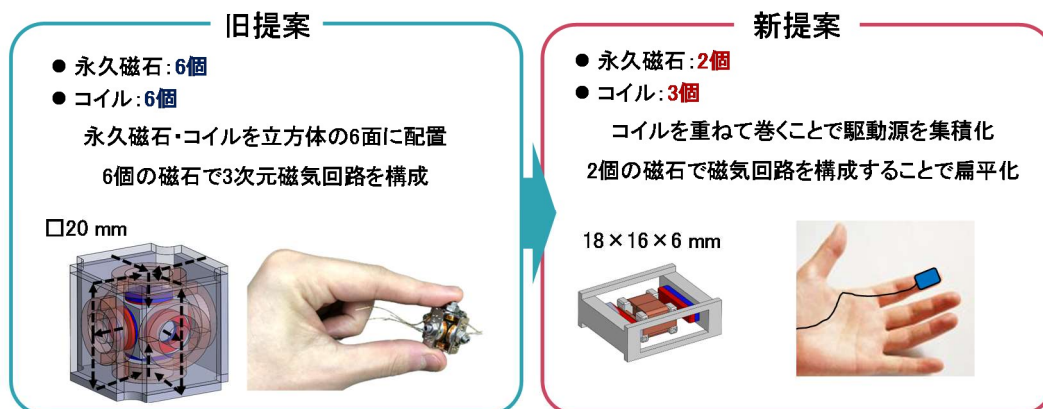


図 8 3D-LOA の扁平化

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

学術論文(査読付)

1. R. Nakamura, A. Heya, and K. Hirata, "Performance Analysis of a Compact Three-Degree-of-Freedom Oscillatory Actuator for Haptic Device", IEEJ Transactions on Electrical and Electronics Engineering, vol. 17, no. 6, pp. 881-889, 2022.
2. 山本翔大, 部矢明, 平田勝弘, "扁平構造を有する 3 次元力覚提示アクチュエータの提案", 日本 AEM 学会誌, vol. 30, no. 2, pp. 173-178, 2022.

国際・国内会議(査読無)

1. 部矢明, 中村亮介, 平田勝弘, "3 次元力覚提示アクチュエータの開発", ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2022.06.
2. 山本翔大, 部矢明, 平田勝弘, "扁平構造を有する 3 次元力覚提示アクチュエータの提案", 第 30 回 MAGDA コンファレンス in 広島, pp. 221-226, 2021.12.