

2023 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	准教授
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開発

2. 研究目的

近年、メタバースの市場は急激に成長しており、3 次元の仮想空間における視覚情報に加えて、空間的な 3 次元力覚情報を提示する技術が注目されている。一般に、空間上の様々な方向へ力を提示する 3 次元力覚提示装置は多数のモータとワイヤ機構やリンク機構を組み合わせて構成されている。そのため、従来システムは大型化と重量の増加が課題となり、携帯可能な 3 次元力覚提示装置の実現は困難であった。また、単純にモータを組み合わせた構造では各アクチュエータの振動中心がずれ、原点から離れた位置での並進振動はモーメントを生むため、正確な力覚提示は困難となる。

そこで報告者はこれまで、1 台で空間上の任意方向に駆動可能な 3 自由度振動アクチュエータ (Three-degree-of-freedom linear oscillatory actuator: 3D-LOA) を提案し、3 自由度振動によって疑似的な力覚提示を行うシステムを提案している。3D-LOA は動力変換機構を用いずにダイレクトに 3 自由度並進振動を生成可能であるため、高応答かつシステムの小型化に貢献する。また、3D-LOA は指先で把持する構造であり複数個を手を持つことは難しかったため、爪の上に装着可能な扁平構造の 3D-LOA を提案した。これにより、片手あたりに対して提示可能な自由度は大幅に拡張できたが、永久磁石を用いる駆動原理のため、サイズの最小化に限界があり、指上での隣接するアクチュエータ同士の接触・干渉が課題となった。

以上の課題を解決するため、永久磁石を用いずにリラクタンス力のみで 3 自由度振動を実現する指輪型 3D-LOA を提案する。永久磁石と比較して、鉄などの軟磁性体は高い加工精度で製作可能であり、非常に小さな部品でも製作できることから、製作可能な最小サイズを大幅に小さくできる。本研究では、新たな 3D-LOA の磁気構造および動作原理を提案し、3 次元力が発生可能であることを示すとともに、実機検証により動作特性を明らかとする。

3. 研究内容及び成果

本研究では、指輪形状の新たな 3 自由度振動アクチュエータを開発した。その構造のモデル図を図 1 に、試作機の外観と指に装着した際の様子を図 2 に示す。本アクチュエータは、内側の固定子と外側の可動子から構成され、固定子の中心に指を入れる構造となっている。3 コイルを有する可動子が振動し、その反力が固定子へコイルばねを介して伝わることで振動を知覚する構造となっている。なお、可動子と固定子にはザグリ穴が施されており、そこにコイルばねを取り付け、接着することで固定している。xy 平面での支持はコイルばねの縦剛性、z 方向にはコイルばねの横剛性を利用して支持する。可動子が 3 次元的に様々な方向に変位した際にも、各コイルばねから変位と逆方向の力が可動子に加わり、原点位置へ復帰するよう設計されている。

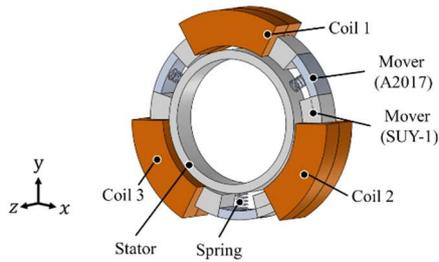


図 1 指輪型 3 自由度振動アクチュエータ



図 2 試作機の外観

提案アクチュエータの駆動原理を図 3 に示す。本アクチュエータは永久磁石を利用しておらず、各コイル通電時に生まれるリラクタンス力を合成することで 3 自由度並進駆動される。xy 平面内駆動の場合、3 コイルに流す電流の大きさを調整することで動作することができ、z 方向駆動では 3 コイルに共通のバイアス電流を与えることで動く。リラクタンス力においては磁気吸引力しか発生させることができないため、コイルばねによる復動力を利用して振動を生み出す機構である。

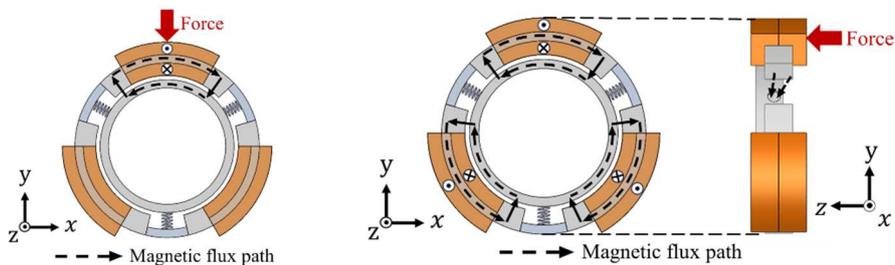


図 3 駆動原理(左:y 方向駆動時, 右:z 方向駆動時)

3 次元有限要素法解析を用いて各コイル通電時の特性を検証するとともに、そのデータをもとにフィッティングした数学モデルの結果を図 4 に示す。両者の結果の一致から、有限要素法解析結果を数学モデルにより正確に再現できていることがわかる。一方、実験により動作検証したところ振動が弱く力覚提示は困難であったため、高推力化を今後検討する。

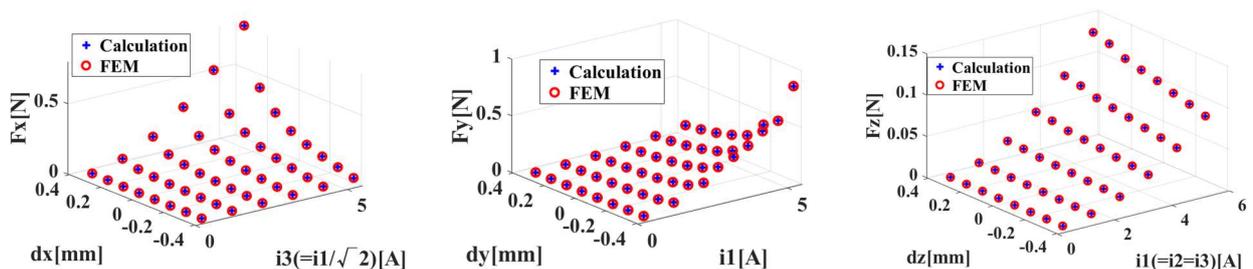
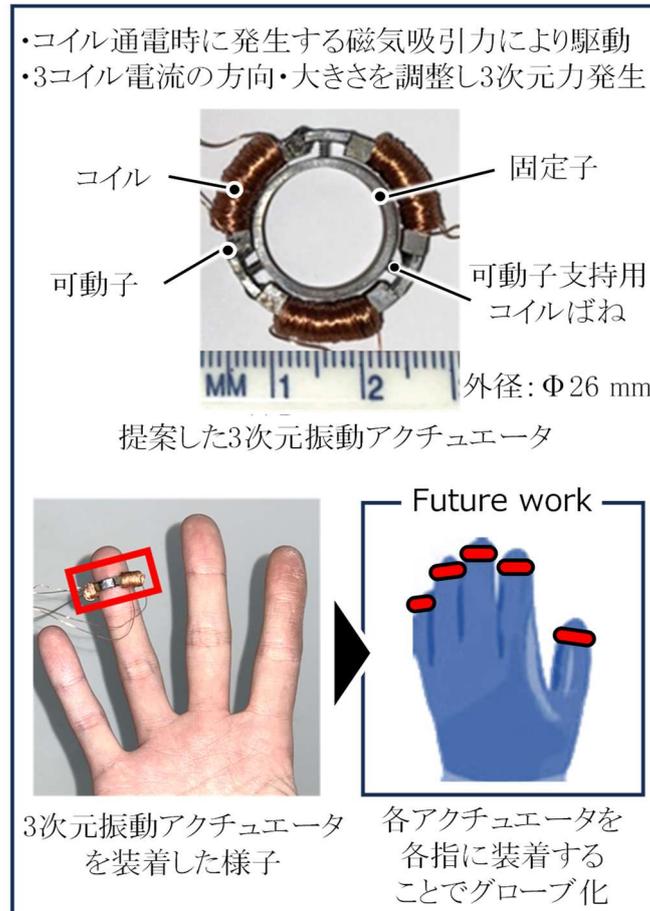


図 4 3 次元有限要素法解析と同モデルの力特性比較(左:x 軸駆動, 中央:y 軸駆動, 右:z 軸駆動)

4. 今後の研究の見通し

本研究では、リラクタンس力で駆動する指輪型 3 次元振動アクチュエータを提案するとともに、その推力特性を 3 次元有限要素法解析によって調査した。また、有限要素法解析結果をもとに 3 次元推力特性のモデリングを実施し、その妥当性を明らかとした。製作した試作機により力覚提示試験を行ったが、振動が解析と比較して小さく、力覚提示は困難であった。そのため、今後は高推力密度化を実現する新たな構造・原理を検討するとともに、5 台の指輪型 3 次元振動アクチュエータを用いた力覚提示グローブの開発を進める。



5. 助成研究による主な発表論文、著書名

・国内会議(査読無)

内藤 出, 部矢 明, 井上 剛志, 3 自由度振動アクチュエータの高推力密度化に関する検討, TOKAI ENGINEERING COMPLEX 2024 (TEC24) 第 73 期総会・講演会, 110, 2024/3/6

・国内特許(2025 年 2 月までに出願予定)