



3D ハプティクスのための 3 次元振動モータ XReactor の振動特性検証

Vibration Characteristics Verification of
XReactor : 3D Vibration Motor for 3D Haptics

小久保颯哉¹⁾, 部矢明¹⁾, 井上剛志¹⁾
Soya Kokubo, Akira HEYA, and Tsuyoshi INOUE

1)名古屋大学大学院 工学研究科 (〒464-0814 愛知県名古屋市千種区不老町)
kokubo.souya.d0@s.mail.nagoya-u.ac.jp
{akira.hey, tsuyoshi.inoue}@mac.nagoya-u.ac.jp

概要 : 近年, メタバース産業の活発化に伴い, XR 技術に関する研究が盛んに行われている. この XR 技術において, より現実環境を再現するには, 力触覚の提示は必要不可欠である. 力触覚提示方法の一つに, 非対称な振動の提示により使用者に牽引錯覚を与える疑似牽引力提示方法がある. 本研究では, 空間的な多自由度疑似牽引力提示を行うために, 3 次元振動モータである XReactor の振動特性の調査を行った.

キーワード : 機構・アクチュエータ, 力覚・体性感覚, 3 次元振動, 非対象振動

1. 研究背景

近年, 国内外問わずメタバース産業の市場規模が増大し [1], それに伴い, XR 技術や遠隔操作技術の研究・開発が盛んに行われている. これらの技術の発達において, より現実に近い環境を再現するには視覚・聴覚のフィードバックだけでは足りず, 力触覚のフィードバックが必要不可欠であると考えられている.

力触覚の提示方法の一つに, 雨宮らが提案した片方が急峻に, もう片方が緩やかに変化するような非対称加速度を提示することで, 急峻な方向に引っ張られるような仮想的な力ベクトルを提示するという方法がある [2][3]. この提示方法を用いることで, 振動のみで連続的に疑似的な牽引力を提示することが可能になり, 小型なデバイスでの力触覚提示を可能にする. この提示方法を用いた 1 自由度提示デバイスの研究は盛んに行われ, また, 一自由度を複数組み合わせた多自由度提示デバイスの研究も行われている [4][5]. しかし, 複数のデバイスを組み合わせる方法では総デバイス数が増加し, デバイス全体の大型化が避けられない [4][6]. そこで単体で多自由度振動が可能なモータに着目した.

多自由度モータの研究において, 部矢らは振動中心が一つであり, 単体で 3 自由度の振動が可能なモータを提案した [7]. しかし, 推力が約 0.09 N であり疑似牽引力提示を

行うには小さい. そこで, その 6 倍の高出力化を達成した 3 次元振動モータ XReactor が提案されている [8][9].

本研究では, XReactor における, 各方向の周波数応答特性と, 非対称振動時の加速度の測定から, 基本特性の調査を実施した.

2. XReactor

本章では, 1 台のみで 3 次元振動が可能な振動モータである XReactor について, その構造と駆動原理についての説明を行う.

2.1 構造

本研究で使用する 3 次元振動モータの XReactor の概形を図 1 に示す. 本モータは外側の固定子と, 内側の可動子からなる. 大きさは 20 mm×20 mm×20 mm であり, 固定子質量が 18.9 g, 可動子質量が 15.5 g の全質量 34.4 g である. また, 可動子のコイルは x, y, z 方向すべて線径 0.24 mm であり, 巻き数は占積率 60 %となる 132 巻きである. 本モータでは 1 つの振動中心で 3 次元振動を行うために, 圧縮コイルバネを固定子に内包することで固定子と可動子を同じ中心位置で支持している. x 方向及び y 方向の振動に対する支持は xy 平面上で $\pm 45^\circ$, $\pm 135^\circ$ で自然長 8 mm, ばね定数 0.242 N/mm のばねを合計 8 つ配置されている. また, z 方向では固定子と可動子の対向面に自然長 4.4

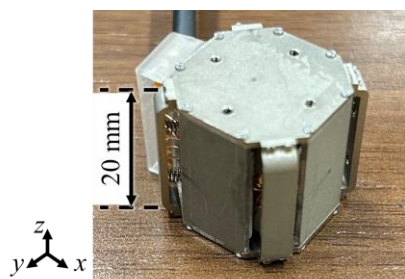


図 1 XReactor の概形

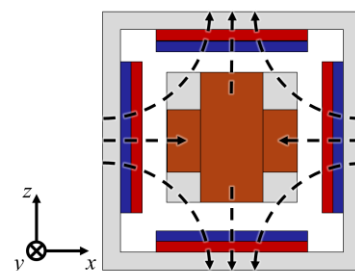


図 2 可動子固定子間の磁気回路

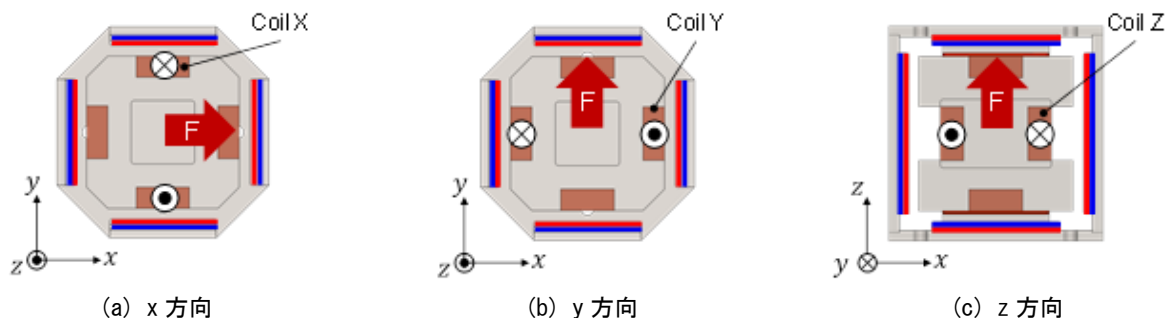


図 3 駆動原理の簡略図 [8]

mm, ばね定数 4.168 N/mm のばねを上面と下面で合計 8 つ配置している。

2.2 駆動原理

本モータの駆動原理について、図 2 に可動子と固定子間で生じる磁気回路を、図 3 に各方向での駆動原理の簡略図を示す。x, y, z の各方向の永久磁石の磁極が対向していることで、可動子のコイルに電流を流すことで生じる磁束により引力・斥力が発生することで推力が発生する。さらに、各方向のコイル及び永久磁石は直交に配置されているため、互いに干渉することなく駆動させることが可能である。これにより本モータは、各方向に入力する電流の組み合わせにより、任意の方向に任意の波形で振動させることを可能にしている [10]。

3. 実機試験

本章では本モータを用いて 3 次元疑似牽引力提示が可能であるかを検証するために、周波数特性および任意振動入力時の加速度波形の調査を行った。

3.1 実験環境

本実験の実験環境を図 4 に示す。本実験では、XReactor をデバイス適用した場合を考慮して、アルミニウム合金 (A2017) で作成した 0.1 kg の付加質量を固定子に与えた状態での固定子の加速度を測定している。図 4 に示すように XReactor を付加質量の中心に両面テープで接着し、付加質量を挟んだ反対面に 3 軸加速度計 (356A32, 東陽テクニカ) を両面テープで接着している。また、この付加質量はバンドゴム (モビロンバンド, 日清紡ホールディングス株式会社) を 3 つつなぎ、錘の対角線方向 4 か所を 2 つのベースにつるしている。ゴムをつるすベースの間隔は 125 mm である。XReactor に入力する電圧はバイポーラ電

源 (PBZ-40-10, KIKUSUI) を用いることで印可する。3 軸加速度計で測定した x, y, z 方向の加速度と入力した電圧はデータロガー (GL900, グラフテック株式会社) を用いてサンプリング周波数 5 kHz で計測している。

3.2 周波数特性

本実験では x, y, z の各方向に対して対応したそれぞれのコイルに、バイポーラ電源を用いて電圧振幅 1V, スイープ時間 60 s で 1 Hz から 300 Hz までの線形スイープ入力を行う。また、この時測定したスイープ電圧を入力、固定子の加速度を出力として、伝達関数推定を行うことで電圧一加速度の周波数応答特性解析を行った。

実験により得られた固定子における電圧一加速度の周波数応答特性を図 5 に、各方向にスイープ入力したときの時刻歴を図 6 に示す。図 5 より、x, y 方向のピークのがそれぞれ二つずつに存在していることがわかる。これは XReactor の x 方向と y 方向の剛性に等方性が存在するためそれぞれの方向でもう一方方向のピークが発生していると考えられる。これは支持剛性に異方性を持たせることで

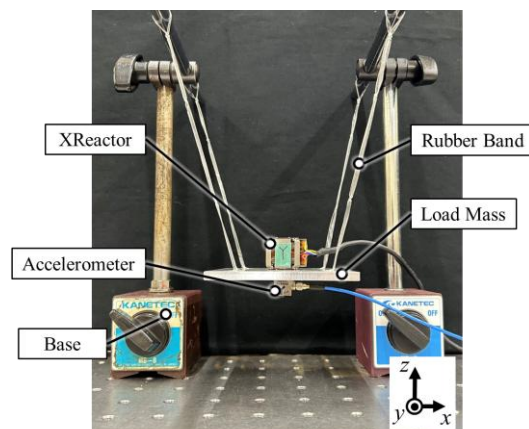


図 4 実験環境

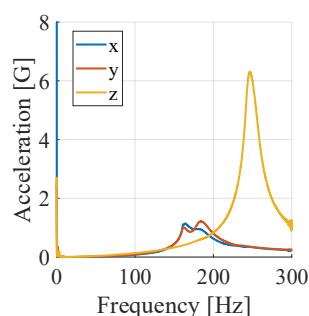


図 5 周波数応答特性

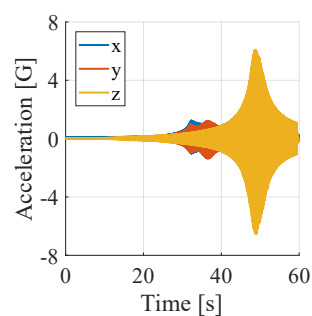


図 6 スイープ入力時の各方向時刻歴

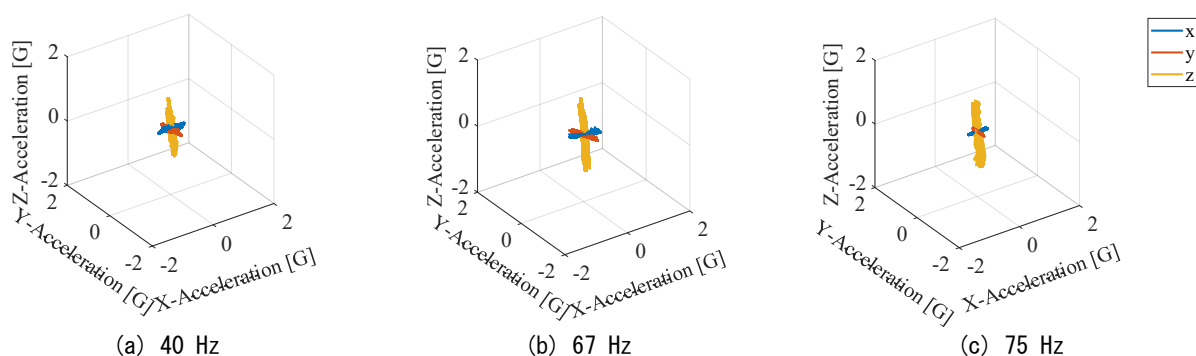


図 7 3 方向それぞれに提示した時の加速度 3 次元軌跡

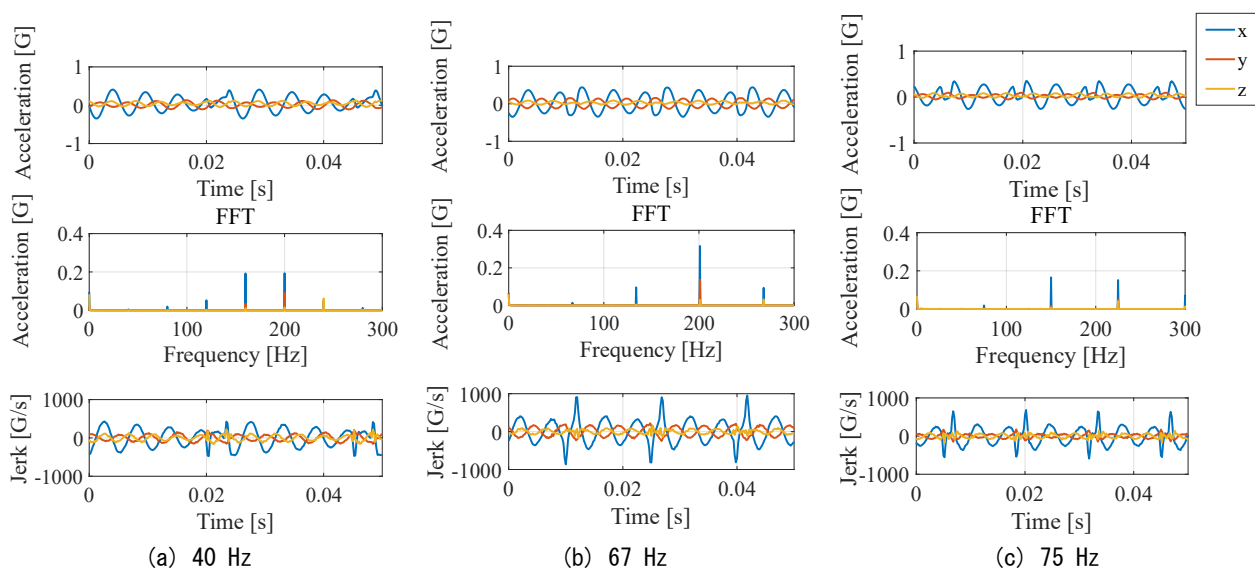


図 8 x 方向提示時の加速度とその周波数成分, およびジャーク

ピークをずらし解決できると考えられる。また、各方向のピーク周波数は 150~200 Hz 以上となっている。これは支持に用いているコイルばねの剛性を下げることでピーク周波数を下げることができる。

3.3 加速度波形計測

本実験では, XReactor が 3 次元に擬似牽引力を提示することに期待できるかどうかを確認するために, 矩形波を入力した場合の加速度を測定する。ここで, 入力する電圧波形は電圧振幅 1 V であり, 周波数 40 Hz, 67 Hz, 75 Hz, デューティ比 13 % の矩形波の 3 つについてそれぞれ実験を行った。今回使用する矩形波の周波数のうち, 周波数 67 Hz は実験により決定した。また, 40 Hz および 75 Hz は田辺らの先行研究より 1 自由度において最も強く疑似牽引錯

覚を起こす周波数であるため使用した [11]。また, デューティ比は実験により決定した。

x, y, z 方向に提示した時のそれぞれの 3 次元加速度軌跡を重ねたものを図 7 に, そのうちの x 方向提示時の加速度, その周波数成分およびジャーク (加加速度) の時刻歴を図 8 に示す。図 7 より, 矩形波電圧を入力した方向から振動軸が大きくずれることなく, 各方向に加速度を発生させることができているとわかる。しかし, 一部他軸方向にも振動が発生している。これは入力した矩形波の倍数成分となる周波数が図 5 に示す各方向のピークの周波数に近い値となることで, 狙った方向以外の振動が発生していると考えられる。これは入力する周波数の倍数成分がピークと重ならない矩形波を用いることで狙った方向以外

振動を抑えることができると考えられる。また図 8 より、67 Hz と 75 Hz では、ジャークが急激に増加する箇所が存在する。このことから加速度に時間方向の非対称性が大きく発生する箇所があり、疑似牽引力提示に期待をすることができる。一方で 40 Hz では、他 2 つとは違い急変するジャークの大きさが急変の伴わない部分と大きく変わらないことがわかる。以上より、3 つのコイルに一定の割合で矩形波電圧を印加するとき任意の方向に 3 次元に時間方向の非対称性を持った振動を発生させることができる。

4. 結論

本予稿では、3 次元疑似牽引力提示を行うために使用する 3 次元振動モータである XReactor について、まず構造や駆動原理について説明を行い、また、実機を用いて周波数応答特性と矩形波入力時の固定子加速度波形について実験を行った。実験結果より、この XReactor は任意のコイルに電圧を印可することで単体で 3 軸方向それぞれに独立した非対称振動を発生させることが可能であることを明らかにした。

今後はこの XReactor を用いて、まず被験者による疑似牽引力提示の提示方向の正答率を用いて人の知覚特性を調査する。

参考文献

- [1] 総務省, “令和 6 年版情報通信白書,” 2024.
- [2] 雨宮智浩, 安藤英由樹, 前田太郎, “知覚の非線形性を利用した非接地型力覚惹起手法の提案と評価,” *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, 第 11 巻, 第 1, pp. 47-57, 2006.
- [3] A. Tomohiro and M. Taro, "Asymmetric Oscillation Distorts the Perceived Heaviness of Handheld Objects," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 1, no. 1, pp. 9-18, 2008.
- [4] 奥田悠斗, 小水内俊介, 近野敦, “振動子を用いた多自由度空中力覚提示装置の開発と評価,” *ロボデイクス・メカトロニクス講演会講演概要集*, 第 17 巻, 第 2, 2017.
- [5] H. Gomi, S. Ito and R. Tanase, "Innovative mobile force display: Buru-Navi," in *26th International Display Workshops (IDW' 19)*, Sapporo, Japan, 2019.
- [6] 鈴木隆史, 曲谷一成, “リニア振動アクチュエータを用いた方向提示デバイスの開発,” 第 16 巻, 第 2, p. 49-54, 6 2016.
- [7] A. Heya, R. Nakamura and K. Hirata, "Development of Compact 3-Degree-of-Freedom Oscillatory Actuator," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 35, no. 5, pp. 1312-1320, 2023.
- [8] 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,” 著: *日本機械学会東海支部第 73 期総会*, 2024.
- [9] 部矢明, 内藤出, 井上剛志, “3 次元振動モータ,” 著: *第 37 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム*, さいたま市, 2025.
- [10] A. Heya, K. Hirata, T. Matsuda and Y. Kono, "Design and Analysis of a Three-Degree-of-Freedom Linear Oscillatory Actuator," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 56, no. 2, 2020.
- [11] T. Tanabe, H. Endo and S. Ino, "Effects of Asymmetric Vibration Frequency on Pulling Illusions," *Sensors*, vol. 20, no. 24, 2020.