

非対称振動を用いた牽引力錯覚の二次元提示

春名悠介^{†1} 橋本渉^{†1} 水谷泰治^{†1} 西口敏司^{†1}

概要： 非対称振動とは往復で振動加速度が異なる振動で、この振動を提示されたとき、人は疑似的に並進力を感じることが知られている。これを牽引力錯覚という。従来研究によると、牽引力錯覚は並進方向ではほぼ正確に提示できることがわかっている。本研究では二次元に拡張した既存研究を参考に、指先に二次元提示する方法を提案し、その手法でどれだけ正確に牽引力錯覚を提示できているかを検証する。

1. はじめに

近年、力覚を提示する装置が多く開発されている。しかし、その多くは装置自体を外部環境に固定しているものが多い。装置を外部環境に固定する場合、動きが極端に制限される場合がある。力覚を実際に提示する装置は動きが制限されるものが多いが、振動フィードバックを利用すれば実際に力覚を出すことはできないが牽引力を提示することが可能であることがわかっている。雨宮らは人が刺激を認知するとき非線形性がある事実にもとづき、非対称な加速度パターンを持つ波形を生成し、牽引力が生じることを示している[1]。田辺らは2つのボイスコイルにより並進力だけでなく回転力提示を試みたり[2]、非対称振動の一つとして正弦波の基本波と二次高調波を足し合わせた波形で牽引力錯覚が生起することを示している[3]。また暦本は、雨宮らの研究が一次元だったのに対し、二次元に拡張した実験を試みており、平面上の8方向で15~35%、45度の誤りを許容した場合は8方向で40~75%の正解率を得ている[4]。

本論文では、従来研究より正確に牽引力を、人間の指先に二次元提示可能な方法を提案しその結果を報告する。二次元提示が可能であることが明らかになれば、歩行者誘導や視覚障害者の誘導への応用が期待できる。

2. 提示方法

牽引力錯覚の生成における先行研究によると、ボイスコイル型の振動アクチュエータを使用しているのが一般的である。本研究では類似の仕組みを持ち、ゲーム用のコントローラにも使用されているALPS社のハプティックリアクタ Hybrid Tough Type（以下、振動子）を使用することにした。この振動子は、筐体の両端に磁石を設置し中央に設置したコイルに電流を印加することで磁界が発生し、コイルが一定方向に移動することで振動が発生する仕組みである。

振動子に印加する信号は、PCのオーディオ信号をデジタルアンプ（Lepy LP-2020A+）で増幅している。この振動子

の共振特性を調べるため、振動子に衝撃センサ（村田製作所 PKS-4A1）を取り付け、正弦波信号を入力して振動の出力特性を観測したところ、約70Hz、105Hz、210Hzあたりにピークがあることがわかった。ただし、人間が最も振動を大きく感じるのは、これら3つのピークのうち70Hzだったため、以降の実験では70Hzの周期波形を用いることにした。また、提示する非対称振動についても、二次高調波など様々な波形を用いて牽引力錯覚が最も大きく感じられた、のこぎり波を使用することにした。

次に振動子の把持の仕方について検討した。振動子を握ったり、指先に巻き付けたり、様々な持ち方により牽引力錯覚を提示できる方法を試行錯誤したところ、振動子を指先で軽くつまんだ場合が最も良いことがわかった。現段階では、指先に剪断力が働くような牽引力提示が最も知覚されやすいといえる。これらの条件で、35名に並進方向（前後）への牽引力錯覚提示を試みたところ、35名全員が牽引力の方向を正しく知覚していることがわかった。

二次元での牽引力錯覚提示のためには、振動子を2つ組み合わせることになる。組み合わせ方も無数に存在するが、試行錯誤の末、図1のように振動子を配置することにした。互いの振動子が干渉しないようにシリコンゴムで振動子を結合し、その両端を示指と母指+中指で把持する。図1の配置の場合、左側の振動子が紙面向かって左右方向、右側の振動子が紙面前後方向に振動することになる。

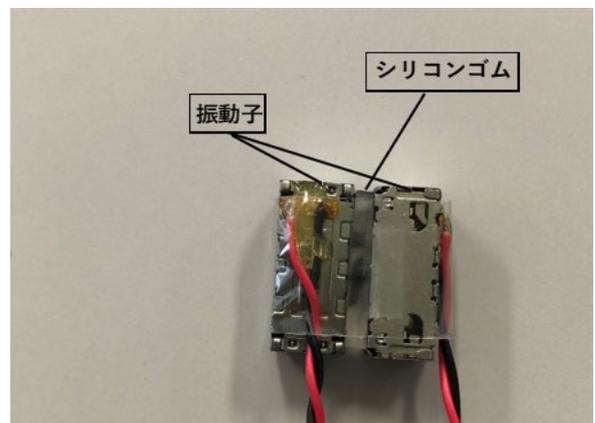


図1 振動子の構成



図 2 実験環境の外観

3. 二次元提示に関する実験

3.1 方法

2 章で述べた提示方法において、二次元方向をどれぐらい正確に提示することができるかを調査するための実験を実施した。実験環境は図 2 のとおりである。実験参加者は振動子を利き手で把持し、前後左右の平面上で 8 方向の牽引力錯覚を知覚するであろう振動パターンを提示し、どちらの方向と知覚したかを答えてもらうものである。

実験参加者は健康な成人男性 10 名で、全員が学生である。その内 3 名が左利きであった。参加者は聴覚の情報を遮断するためイヤーマフを装着し、振動子を利き手で把持する。10 秒間非対称振動を提示した後どの方向に牽引力を感じたか方向を記入してもらうと共に休憩を挟む。提示方向は前方正面を 0 度として、0 度から時計回りで 45 度間隔、315 度までの計 8 方向とした。このタスクを 8 試行×3 セット行う。8 方向の順番はランダムであるが、必ず 8 方向を含むものとし、3 セットとも同じ順番で提示した。また、セット間と被験者の申し出により休憩を挟む。以上の実験を開眼状態と閉眼状態で行う。開眼時には振動子が傾かないように自身の手を目視してもらう。実験参加者 10 名の内 4 名には開眼状態と閉眼状態両方の実験を行ってもらった。実験参加者には事前にどの平面上に牽引力錯覚を提示するかを伝えたが、提示する 8 方向がすべて異なる方向であることは伝えなかった。これは、実験参加者が提示されている方向を迷った際にまだ回答していない方向であると消去法で予測されないようにするためである。

表 1 閉眼状態における実験結果のマトリックス図及び各提示方向の正答率

| 提示\回答 | 0° | 45° | 90° | 135° | 180° | 225° | 270° | 315° | 回答数 | 誤差なし | ±45°の誤差あり |
|-------|----|-----|-----|------|------|------|------|------|-----|-------|-----------|
| 0° | 14 | 1 | | | | 1 | 2 | 3 | 21 | 0.667 | 0.857 |
| 45° | 5 | 6 | 2 | | 1 | | 2 | 5 | 21 | 0.286 | 0.619 |
| 90° | | 3 | 11 | 4 | 2 | 1 | | | 21 | 0.524 | 0.857 |
| 135° | 1 | 2 | 3 | 7 | 4 | 1 | 2 | 1 | 21 | 0.333 | 0.667 |
| 180° | | | | 3 | 11 | 5 | 1 | 1 | 21 | 0.524 | 0.905 |
| 225° | 1 | | | 2 | 7 | 8 | 2 | 1 | 21 | 0.381 | 0.810 |
| 270° | | 2 | 2 | | 1 | 2 | 11 | 3 | 21 | 0.524 | 0.762 |
| 315° | 7 | 2 | | 3 | 1 | 1 | 7 | | 21 | 0.333 | 0.714 |

表 2 開眼状態における実験結果のマトリックス図及び各提示方向の正答率

| 提示\回答 | 0° | 45° | 90° | 135° | 180° | 225° | 270° | 315° | 回答数 | 誤差なし | ±45°の誤差あり |
|-------|----|-----|-----|------|------|------|------|------|-----|-------|-----------|
| 0° | 14 | 1 | | | | 1 | | 5 | 21 | 0.667 | 0.952 |
| 45° | 10 | 5 | 1 | | 2 | | | 3 | 21 | 0.238 | 0.762 |
| 90° | | 2 | 12 | 7 | | | | | 21 | 0.571 | 1.000 |
| 135° | | 3 | 2 | 6 | 8 | 1 | 1 | | 21 | 0.286 | 0.762 |
| 180° | | | 1 | 3 | 12 | 4 | 1 | | 21 | 0.571 | 0.905 |
| 225° | | | 1 | | 4 | 14 | 2 | | 21 | 0.667 | 0.952 |
| 270° | | 1 | 1 | 1 | 3 | 4 | 10 | 1 | 21 | 0.476 | 0.714 |
| 315° | 5 | 2 | | | 1 | 1 | 2 | 10 | 21 | 0.476 | 0.810 |

表 3 正答率の平均

| | (a)閉眼状態 | | (b)開眼状態 | |
|------|---------|-----------|---------|-----------|
| | 誤差なし | ±45°の誤差あり | 誤差なし | ±45°の誤差あり |
| 平均値 | 0.446 | 0.696 | 0.494 | 0.857 |
| 前後左右 | 0.560 | 0.845 | 0.571 | 0.893 |
| 斜め方向 | 0.333 | 0.702 | 0.417 | 0.821 |

3.2 実験結果

表 1, 2 に実験で得られた結果をもとに作成したマトリックス図と各提示方向の正答率を示す。縦軸が提示した方向で横軸が実験参加者の回答となっている。マトリックス図を見ると、閉眼状態と開眼状態でおおよそ対角線上に回答が集まっており、同じような傾向がみられることがわかる。ただし、開眼状態と閉眼状態での 225 度と 315 度の部分を見ると、開眼状態のほうが正答率が高くなっていることが確認できる。

表 3 は閉眼状態と開眼状態の正答率の平均を示しており、前後左右が 0 度、90 度、180 度、270 度の 4 方向の平均値で、斜め方向が 45 度、135 度、225 度、315 度の 4 方向の平均値となっている。この結果を見ると、前後左右方向へ牽引力を提示した場合の正答率の平均は、閉眼状態、開眼状態ともに 5 割を超えており、±45 度まで許容した場合には 8 割を超えていることがわかる。よって±45 度まで許容した場合には、牽引力錯覚をほぼ正確に回答できているといえる。一方で、斜め方向の平均を見ると、閉眼状態、開眼状態共に 5 割未満とチャンスレベルは上回っているが正確に方向を提示できているとはいえない結果となった。しかし、±45 度まで許容した場合には閉眼状態で 7 割、開眼状態で 8 割とおおよそ正確に方向が提示できているといえる。また、全体的に開眼状態の正答率が高いことわかる。

3.3 考察

表 1 から開眼状態の 225 度と 315 度において正答率が高くなっているが、その原因として、振動子とアンプを接続するケーブルが左側についているため左方向に物理的に牽引されたと感じた人が多かったと考える。しかし、原因に関しては不確かであるため、今後の実験で明らかにする必要がある。

開眼状態の正答率が閉眼状態に比べ高くなった原因と

して、実験後の被験者からの意見に、振動子を把持している手が一定の方向に牽引され、その方向を目視することにより振動提示方向を判断したという意見があった。開眼状態の実験参加者全員がこの理由によって正答率が高くなったとは言えないが、少なくとも目視することで正答率が上がった被験者が数名いたということは確かである。そのため、実験中に自身の手を目視することが、開眼状態の正答率が高くなった原因として寄与している可能性があるといえる。

今回、閉眼状態、開眼状態共に従来研究の正答率より若干ではあるが高くなることができた。その要因として前述とは別に考えられるものに、振動子間に振動吸収材として配置したシリコンゴムがある。振動を吸収することで干渉することを可能な限り避けることが可能であるため、振動子ごとの振動がわかりやすくなり正答率が高くなったと考えられる。

4. おわりに

本研究では牽引力錯覚を二自由度でも正確に提示できる手法を確立することを目指し、先行研究[4]を参考に改良を加えた手法を知覚実験により評価した。その結果、閉眼状態の正答率が8方向で33%~56%、45度の誤りを許容した場合は8方向で70%~85%、また開眼状態では41%~57%、45度の誤りを許容した場合は82%~89%という結果が得られた。その要因として考えられる振動吸収材の有無に関して、より振動を吸収することが可能な物体や手法を見つけることで、更に正答率が高くなる可能性が示唆された。そのため、今後はより振動を吸収できる手法を考える必要がある。

表1から開眼状態の225度と315度において正答率が高くなっているが、今回考えられる原因が正しいかどうかは現時点では不確かであるため、今後実験を重ね原因を調査する予定である。

参考文献

- [1] 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, Vol.11, No.1, pp.47-48, (2006).
- [2] 田辺健, 矢野博明, 岩田洋夫: 2チャンネル振動スピーカを用いた非対称振動による非接地型並進力・回転力提示, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.22, no.1, pp.125-134, (2017).
- [3] 田辺健, 矢野博明, 岩田洋夫: 非対称振動の周波数成分に対応した牽引力錯覚の知覚特性, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, (2018).
- [4] 暦本純一: Traxion: 仮想知覚提示デバイス, インタラクティブシステムとソフトウェアに関する研究会 (WISS2013) 論文集, pp.91-96, (2013).