



仮想力覚の振動合成時における 振動軌跡の直線化について

Linearization of Vibration Tracks
During Vibration Synthesis of Pseudo-force

浅野司, 中田崇行
Tsukasa ASANO and Takayuki NAKATA

富山県立大学 工学研究科 (〒939-0398 富山県射水市黒河 5180,
t955002@st.pu-toyama.ac.jp, nakata@pu-toyama.ac.jp)

概要 : 本研究で扱う仮想力覚提示デバイスは, 直交する複数の振動子による振動合成を利用して平面方向への仮想力覚を提示している. しかし, 現状では提示方向の直線性を損なう振動のずれが含まれている. このずれを解消することで, 仮想力覚の提示方向の指向性が向上し, 方向知覚がより鮮明になると考えられる. 本研究では, 振動のずれの原因として予想される振動子間の位相差に着目し, より指向性の高い合成振動を目指す.

キーワード : 仮想力覚, 非対称振動, リサージュ曲線, 振動位相差

1. はじめに

直線方向に振動する物体に対し, 一方方向に大きな加速度を短時間, その逆方向に小さな加速度を長時間という, 加速度の偏った振動(以下, 非対称振動)を発生させ, それを把持することで, 加速度の大きい方向へ牽引されると錯覚する[1]. 本研究では, この錯覚により得られる力覚を仮想力覚と定義する.

仮想力覚の原理を基に, Rekimoto[2]は, リニア振動子へ矩形信号を送信することで非対称振動を生成した. また, 嘉指ら[3]は, [2]の信号生成手法を基に, 複数のリニア振動子から同時に非対称振動を生成し, 振動合成を行うことで二次元平面方向に仮想力覚を提示する手法を提案した. 平面八方向への提示を可能とし, 被験者による方向弁別実験では, 各方向の平均正答率が 54.6[%], ± 45 度方向の誤りを許容した平均正答率が 92.4[%]を示した. 当デバイスでは, 振動子を直交に配置し, 各振動をデバイスの提示方向成分に分解, 合成するというアイデアを基に, 二次元平面方向への提示を可能とした. しかし, 合成振動軌跡を解析した結果, 提示方向以外への振動のずれが含まれていた. この影響により, 振動指向性が低くなっていた可能性がある.

本研究では, 振動子間の位相差を任意に変更した合成振動を再現することで, 振動子間の位相差を明らかにし, 合成振動軌跡の直線化を目指す.

2. 合成振動の評価

2.1 合成振動軌跡が直線性を失う原因

2 台の振動子を配置させた仮想力覚提示デバイスを図 1 に示す.

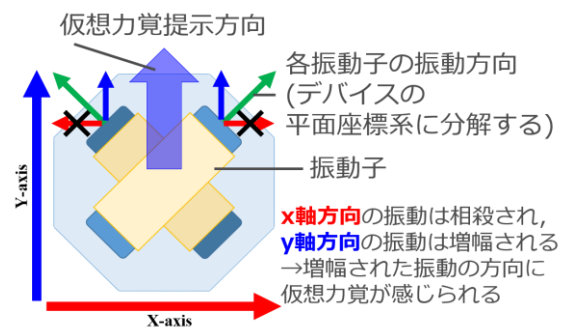


図 1: 振動子を直交配置させた仮想力覚提示デバイス(前方向提示の場合)

仮想力覚提示における振動合成手法[3]では, 以下の手順により提示方向振動を制御できる.

1. 各振動子を互いに直交させた状態で, 仮想力覚提示デバイスの把持部分となるアクリルボードと平行に配置する.
2. 配置した振動子から, 振動周期が同じ非対称振動を発生させる.
3. 各振動子から起こる振動を, デバイスの仮想力覚提

示平面の直交座標系成分に分解する。

4. 各方向成分に分解した非対称振動が、同方向なら増幅され、逆方向なら相殺される。
5. 一方向への非対称振動が増幅されることで、その方向への仮想力覚が求められる。

理論上、仮想力覚を前方向提示する場合には、デバイス平面の前方向に増幅され、左右方向に相殺された合成振動が生成される。その結果、非対称振動の軌跡は前方向に伸びる直線となり、前方向への仮想力覚が提示される。

しかし、仮想力覚提示を行う合成振動には、提示方向の指向性は見られたものの、提示振動軌跡は、提示方向に伸びる楕円形を描いた。この原因は、

- a. 振動子間の位相差が大きく、効率的に振動の増幅、相殺ができていない。
- b. 出力される振動の振幅や波形に差があり、振動が完全に相殺されない。

ということが予想される。

本研究では、原因 a の影響について調査する。これまで、非対称振動を生成する信号は同一のマイクロコンピュータ上から複数の振動子へ同時送信していたため、位相差の発生は想定されていなかった。本研究では、振動子間の位相差を変更した合成振動軌跡を再現し、計測データの軌跡との比較により、信号送信時の位相差の大きさを確かめる。また、計測データから位相差を変更後、合成振動軌跡の直線性が増す再現結果が得られた場合は、実際の振動合成において故意に位相差を設定する検討も視野に入れる。

2.2 リサージュ曲線

合成振動の軌跡は、合成振動が起こる平面方向のリサージュ曲線として評価することができる。リサージュ曲線とは、2つの波形を直交座標系にプロットすることで得られる軌跡である。図2に示すように、リサージュ曲線の性質上、振動周期 1:1 の二つの振動では楕円形軌跡を表す。さらに、振動間の位相差 $\Delta\theta$ が小さいほど、楕円形の短径幅は狭まり、 $\Delta\theta$ が0度の状態では一本の直線となる。直線形の振動合成軌跡を得ることができれば、提示方向以外への振動のずれは解消され、仮想力覚の振動指向性が向上すると考えられる。

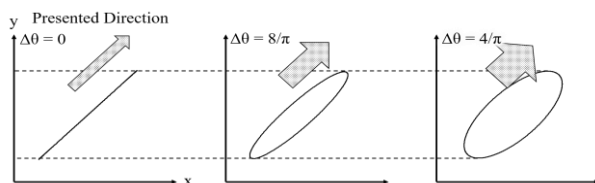


図2: リサージュ曲線(各軸の振動周期 1:1)

3. 実験

3.1 振動位相差を変更した振動合成シミュレーション

本実験では、振動子の振動波形を個別に記録しておき、仮想力覚提示デバイスから起こる合成振動としてデータ上で振動軌跡の再現を行う。さらに、振動波形データの時

間軸を変更し、振動子間の位相差を変更した場合の合成振動軌跡を観測する。

3.2 振動波形の記録方法

各振動子の非対称振動波形は、画像処理を用いて記録する。まず、図3(左)に示すように、チェッカーボードを貼付した振動子をラバーシート上に固定し撮影する。今回、同一のマイクロコンピュータから送信される信号の位相差を求めるため、2台同時に撮影を行う。撮影解像度はそれぞれ高さ 332[pixel]、幅 448[pixel]、フレームレートは 684.6[fps]に設定した。また、図3(右)に示すように、それぞれ別の振動子部分にマスク処理を施すことで、振動子 A、B と区別する。マスク処理後、Zhang のカメラキャリブレーション手法[4]を用いて、チェッカーボードの三次元位置姿勢を推定することで、振動子の変位を記録する。今後の実験に用いるため、振動子 A、B 間の位相差を ΔT とおき、解析時の位相差を $\Delta T = 0$ [フレーム]として、位相差変更の基準とする。

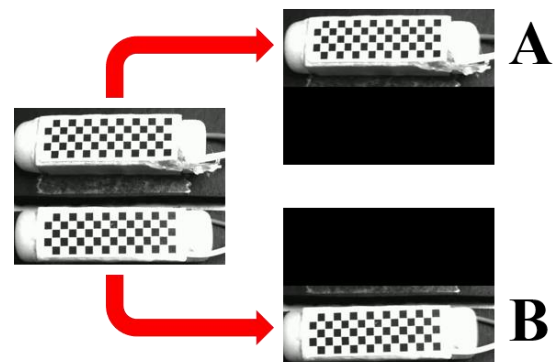


図3: (左)2台の振動子を並列させて撮影した動画。(右)各振動子を区別するためマスク処理を施した動画。

3.3 データ上での振動合成再現、振動位相差変更

2台の振動子を平面上に直交配置させた合成振動を、各振動子の振動解析データ上から再現する。図1に示すように、2台の振動子は、デバイスの仮想力覚提示平面の直交座標系 x, y 軸それぞれに対して、45度回転させた配置となる。そのため、振動振幅を $1/\sqrt{2}$ 倍することで、 x, y 軸成分の振動として分解できる。 x, y 軸成分に分解後の各振動子の振動波形を、 x, y 軸の正負に合わせて加減算を行うことで、前後左右4方向と斜め4方向の計8方向提示の合成振動として再現する。

次に、振動解析データのフレームを変更することで、 ΔT を変更した合成振動を再現する。振動子 A の振動解析データは固定し、B を1フレーム変更する。データの時間分解能は 684.6[fps]であるため、1フレーム変更するごとに約 1.46[ms]の位相差が生まれる。非対称振動の振動周期は 70[Hz]、すなわち一周期約 14.3[ms]であるため、10フレーム変更した時点で周期が一周し、 $\Delta\theta$ に近い合成振動に戻ると思われる。今回は、1フレーム変更するごとに、 $\Delta T = 1, 2, \dots$ と定義する。周期が一周する $\Delta T = 10$ までのシミュ

レーションによる合成振動を求め、位相差を変更した振動子 A, B による合成振動軌跡を観測する。

4. 結果

まず、 $\Delta T = 0$ での振動子間の振動波形、仮想力覚提示方向の合成振動軌跡をそれぞれ図 4, 5 に示す。

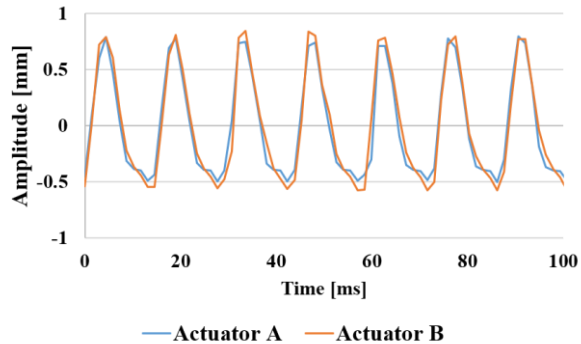


図 4: $\Delta\theta = 0$ での各振動子の振動波形 (前方向への仮想力覚提示を再現)

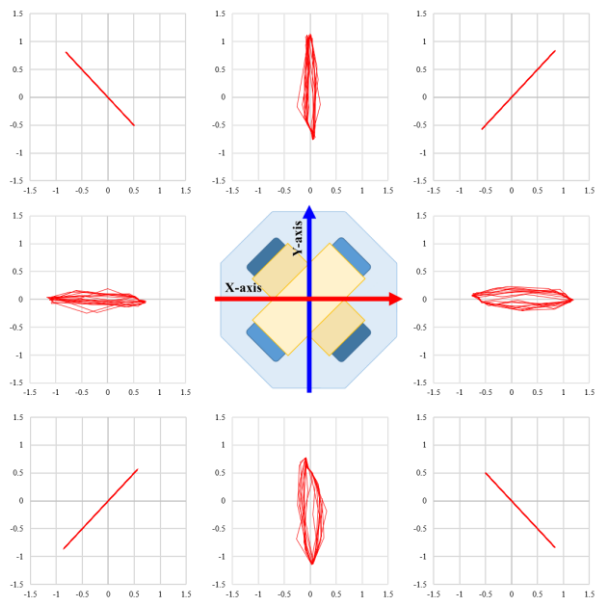


図 5: $\Delta\theta = 0$ での仮想力覚提示方向の合成振動軌跡

図 4 より、振動子 A, B の振動勾配が重なっており、2つの振動子は位相差なく振動していると見られた。

次に、 $\Delta T = 0 \sim 10$ の間で振動位相差を変更した際の合成振動軌跡を図 6 に示す。

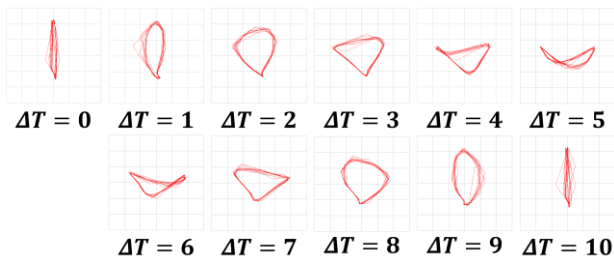


図 6: $\Delta T = 0 \sim 10$ で振動位相差を変更した合成振動軌跡

振動位相差を変更した結果、合成振動軌跡は楕円形軌跡の短径幅が大きくなる変化を見せ、 $\Delta T = 0$ から $\Delta T = 10$ で振動が一周して元の実時間データの軌跡に近い形状を描いた。ここからも、リサーチ曲線の性質上、これまでの振動合成における位相差がほとんどなかったことが示された。

5. 考察

これまでの振動合成における、振動子間の振動位相差は概ね 0 度であったことが示された。これより、現状の仮想力覚の合成振動軌跡が楕円形軌跡を描くことに対して、2.1 において挙げた原因 a は棄却された。

一方で、図 4 より、谷の部分の形状など、各振動子の振動波形がわずかに異なることが示された。振動子間の振動位相は揃っている上で、それぞれの振動波形の違いにより図 5 の x 軸のような相殺しなかった振動を生み出していたと考えられる。

今後は、2.1 において挙げた原因 b について着目することで、合成振動軌跡の直線性向上を目指す。

6. まとめ

本研究では、仮想力覚提示の振動軌跡の直線性が失われる原因を予想し、そのうちの一つである、振動子間の振動位相差について触れた。各振動子の振動を記録し、人為的に位相差を変更するシミュレーションを行った結果、この原因は棄却された。

今後は、振動子間の振動振幅、振動波形について触れ、仮想力覚提示方向の直線化を目指す。

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.47-57, 2006.
- [2] Jun Rekimoto, "Traxion: A Tactile Interaction Device with Virtual Force Sensation," UIST'13, pp.427-431, 2013.
- [3] 嘉指裕介, 浅野司, 中田崇行, “振動合成による仮想力覚提示装置の多方向化,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.24, no.4, pp.401-411, Dec. 2019.
- [4] Z. Zhang, “A Flexible New Technique for Camera Calibration,” Technical Report MSR-TR-98-71, Microsoft Research, Dec. 1998.