



広帯域非対称振動刺激の提示・評価可能な機械式機構の提案

板野凌太¹⁾, 古川正紘¹⁾²⁾, 前田太郎¹⁾²⁾

1) 大阪大学 大学院情報科学研究科 (〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5, ryota.itano@hiel.ist.osaka-u.ac.jp)

2) 脳情報通信融合研究センター (CiNet)(〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-4, {m.furukawa, t.maeda}@ist.osaka-u.ac.jp)

概要: 従来デバイスは評価可能な振動周波数範囲に差異があり, 牽引力錯覚に最適な周波数に関する統一見解は未だ確立されていない. そこで, ギヤと錘で構成された非対称振動提示装置を提案する. この装置は固有周波数に依存する振動子では出力が難しい広帯域の振動刺激を錘の変更により個別に提示, 評価が可能であると考え. 本稿では装置の設計を示し, 実現振動周波数に対する刺激効果量を試算した.

キーワード: 機構・アクチュエーター, 力覚・体性感覚, モデル・計算

1. はじめに

外力を必要とせずにあたかも引っ張られているような感覚が生起される牽引力錯覚は 1 周期ごとの加速度振幅に偏りを持つ偏加速度振動刺激によって生起可能であることが知られている. また偏加速度振動の振動周波数によって錯覚の有無が異なることが報告されているが, 錯覚が生起する周波数の統一見解はわかっていない. その要因として各デバイス間で評価可能な周波数帯が異なっていることにある. ぶるなびのようなデバイスでは比較的大きなマスを振動させるため, 低周波振動において十分な振幅を確保することが可能であった. 対して高周波では周波数によるトルクの増大に耐えうる部品選定が困難であることから実現が難しかった. 雨宮らが提案した市販の振動子による刺激提示 [1] では逆に高周波での振動提示を得意としていたが, 低周波の振動によりマスの変位が大きくなり, 筐体に当たることで十分な振幅が出力できなかったこと, 振動子のばねの固有振動数によってその外の周波数での出力がしにくいことから錯覚が生起する周波数の統一見解を知る点においては不向きであった. 本稿では固有周波数にとらわれないギヤによる回転機構を用いて振動を生成する装置を提案する錘の質量やギヤ比を変えることによって広い周波数で統一された十分な刺激を与えることのできる装置を目指す.

ギヤと錘で非対称振動を実現するための装置を図 1 で説明しながら設計する. まず角速度 ω で回転するギヤ 1 (G1) の回転中心から距離 r_1 の位置に自転するギヤ 2 (G2) を, G1 と同軸に G2 と同一モジュール, 歯数のギヤ (GB) を回転しないように固定すると G2 は自転しながら G1 の回転中心を公転する. この時 G2 は 2ω で自転する. G2 から r_2 の位置に錘を置くと, 錘は

$$x = r_1 \cos(\omega t) + r_2 \cos(2\omega t) \quad (1)$$

$$y = r_1 \sin(\omega t) + r_2 \sin(2\omega t) \quad (2)$$

で振動する. ギヤの回転方向を変化させると $\omega = -\omega$ となるため振動の極性を対称に反転させることが可能であり, 同様の機構を左右対称に配置することによって左右方向の振動を打ち消し前後方向の振動のみを提示することが可能である.

2.2 装置概要

装置が把持部に刺激を与える原理をモデル化するため図 2 に示すような錘 (m), 装置本体 (M) が絶対座標 x_m, x_M に位置する, 2 質量モデルを考える.

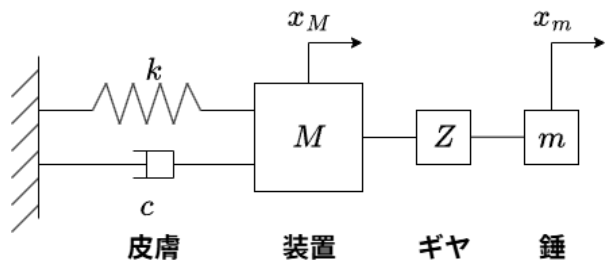


図 2: 装置モデル

まず皮膚と装置の間でかかる力を F_{SM} , 装置とおもりの間でかかる力を F_{Mm} としたとき以下の式が成り立つ

$$\begin{cases} F_{SM} = M\ddot{x}_M + F_{Mm} \\ F_{Mm} = m\ddot{x}_m \end{cases} \quad (3)$$

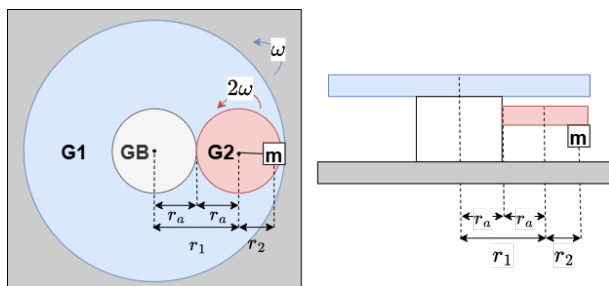


図 1: 機構の簡略図 左: 機構上面 右: 機構側面

これらの連立式を F_{SM} について整理すると

$$F_{SM} = M\ddot{x}_M + m\ddot{x}_m \quad (4)$$

となる。次に錘と装置本体の相対変位の加速度 $\Delta\ddot{x} = \ddot{x}_m - \ddot{x}_M$ を代入して整理すると以下の式となる。

$$F_{SM} = (M + m)\ddot{x}_M + m\Delta\ddot{x} \quad (5)$$

ここで Δx はギヤによる錘の振動 (式 1, 2) と等価である。装置が生成する刺激量を試算するためには式 5 のうち定義されていない x_M を求める必要がある。そこで装置を握ったときに変化する皮膚内の弾性係数 k , 皮膚内の粘性係数 c , 装置の振動加速度と装置の振動のつり合い点 x_0 として装置が生成する刺激量は以下の式であらわされる。

$$F_{SM} = -k(x_M - x_0) - c\dot{x}_M \quad (6)$$

この式の妥当性を確認するため文献 [2] における機構を用いた試算と検証を進める。

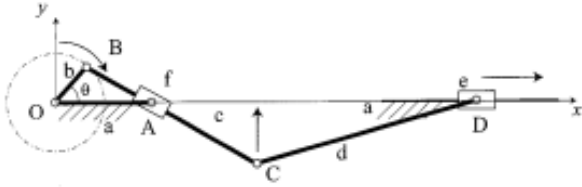


図 3: 検証する偏加速度提示機構 [2] より引用

ぶるなびでは錘によって生成される振動が図3から $\Delta x = OD$, $r = OB$, $l_1 = BC$, $l_2 = CD$ であるとき以下の式で与えられる。

$$\begin{cases} \Delta x = r \cos(\omega t) + \mu(d - r \cos(\omega t)) \\ + \sqrt{l_2^2 - (r(\mu - 1) \sin(\omega t))^2} \\ \mu = \frac{l_1}{\sqrt{r^2 + d^2 - 2rd \cos(\omega t)}} \end{cases} \quad (7)$$

また、加速度センサを装置本体につけ装置を強く握ったとき、弱く握ったときの図3で示されている x 軸方向の皮膚変形を実測加速度データから計算したグラフを以下に示す。

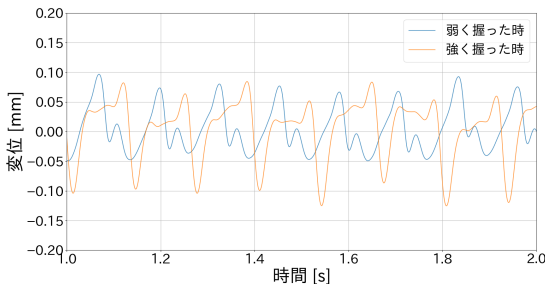


図 4: 実測データをもとにした握り方の違いによる変位の比較

次に k と c を求める。加速度データのスペクトル解析から共振周波数を求め、共振周波数を用いて装置自体を握りこむ

強さを変化させたときの弾性係数 k を以下の式で算出した。

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (8)$$

また、共振周波数での振幅ピークから $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 倍の点の周波数 (f_1, f_2) を求めると Q 値は $\frac{f_n}{f_2 - f_1}$ で計算ができるため、粘性係数 c を Q 値を用いて以下の式で算出した。

$$Q = \frac{\sqrt{k(M + m)}}{c} \quad (9)$$

表 1 に計算したパラメータを示す。

表 1: 算出パラメータ

	弱く握ったとき	強く握ったとき
f_n [Hz]	74.22	152.83
k [N/m]	108731.91	461061.13
c [Ns/m]	3.07	164.90

計算したパラメータの結果を見るとデバイスを強く握るほど手とデバイスの結合が強固になることで弾性係数が大きくなり、振動エネルギーが手によって吸収されやすくなることで粘性係数が大きくなるという、物理的な現象と一致していることがわかる。

c , k を用いた実測加速度データによる装置から皮膚への刺激量のグラフを以下に示す。

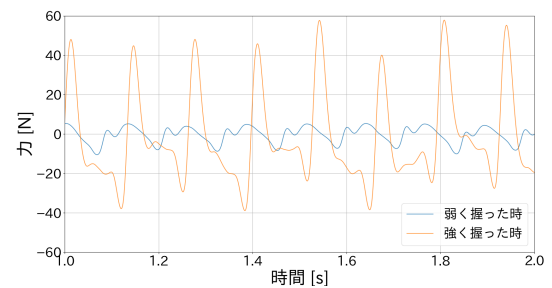


図 5: 実測データをもとにした握り方の違いによる力の比較

次に式 5, 6 を用いてぶるなびの装置質量 $M = 425\text{g}$, $m = 75\text{g}$, $f = 10$, $x_0 = 0$ とし握る強さごとの皮膚が受ける力と皮膚変形をシミュレーションした結果が以下のとおりである。

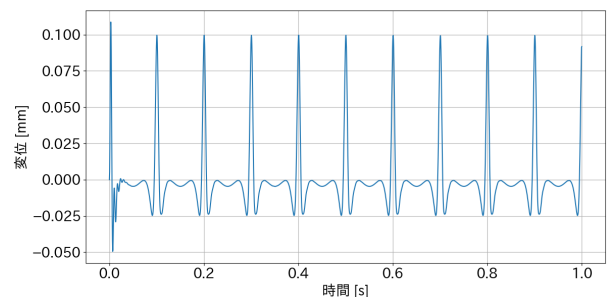


図 6: 強く握ったときの皮膚の変形量シミュレーション

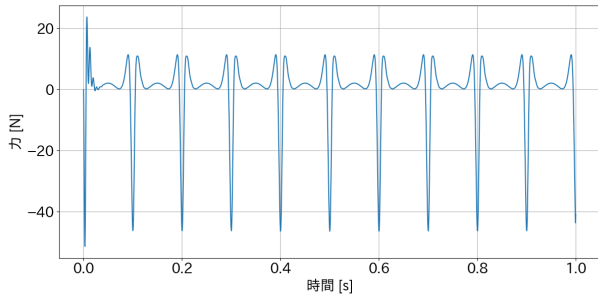


図 7: 強く握ったときの皮膚への力のシミュレーション

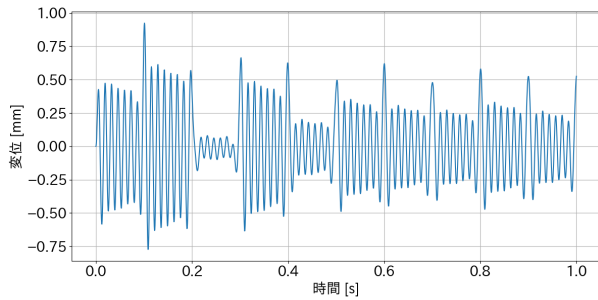


図 8: 弱く握ったときの皮膚の変形量シミュレーション

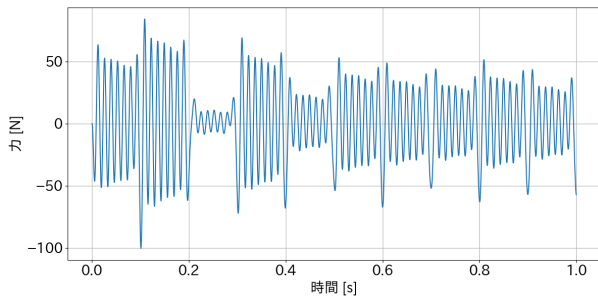


図 9: 弱く握ったときの皮膚への力のシミュレーション

2.3 広帯域・定強度刺激の実現可能性

広帯域の周波数での定強度刺激, つまり振動の角速度が変化しても加速度振幅を一定に保ちながら把持部に刺激をするための重りと装置の質量比の試算を行う。まず, x_M, F_{SM} を求めるために角周波数成分に対するシステムの応答を考える。システムと皮膚の機械インピーダンスを $Z_{system}(\omega), Z_{skin}(\omega)$ としたとき式 5, 6 より以下の式であらわされる。

$$\begin{cases} Z_{system}(\omega) = k - (M + m)\omega^2 + j(c\omega) \\ Z_{skin}(\omega) = k + jc\omega \end{cases} \quad (10)$$

基本周波数成分の変位と力の振幅は

$$\begin{cases} |X_{M,\omega}| = \frac{m\omega^2 r_1}{|Z_{system}(\omega)|} \\ = \frac{m\omega^2 r_1}{\sqrt{(k - (M + m)\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \\ |F_{SM,\omega}| = |Z_{skin}(\omega)| |X_{M,\omega}| \\ = \sqrt{k^2 + (c\omega)^2} |X_{M,\omega}| \end{cases} \quad (11)$$

となり高調波成分の変位と力の振幅は同様に

$$\begin{cases} |X_{M,2\omega}| = \frac{4m\omega^2 r_2}{|Z_{system}(2\omega)|} \\ = \frac{4m\omega^2 r_2}{\sqrt{(k - (M + m)(2\omega)^2)^2 + (2c\omega)^2}} \\ |F_{SM,2\omega}| = |Z_{skin}(2\omega)| |X_{M,2\omega}| \\ = \sqrt{k^2 + (2c\omega)^2} |X_{M,2\omega}| \end{cases} \quad (12)$$

最終的な力のピーク値は以下の式で与えられ, この値を近似的に目標とする刺激量 F_{target} として扱う。

$$F_{target} = |F_{SM,\omega}| + |F_{SM,2\omega}| \quad (13)$$

また, 指への力提示が可能になる条件として, ギヤの振幅が指の変位振幅を下回らないという条件を式で表すとまず機構の最大変位 $|\Delta x|_{peak}$ は

$$|\Delta x|_{peak} \simeq r_1 + r_2 \quad (14)$$

であり, 皮膚の最大変位 $|x_M|_{peak}$ は

$$|x_M|_{peak} \simeq |X_{M,\omega}| + |X_{M,2\omega}| \quad (15)$$

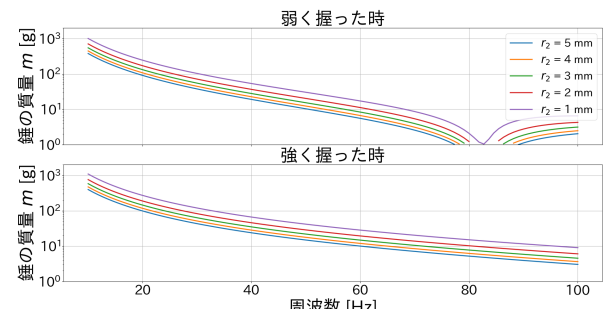
である。つまり目標とする力を提示するためには

$$|\Delta x|_{peak} > |x_M|_{peak} \quad (16)$$

$$r_1 + r_2 > \frac{m\omega^2 r_1}{|Z_{system}(\omega)|} + \frac{4m\omega^2 r_2}{|Z_{system}(2\omega)|} \quad (17)$$

の条件を満たす必要がある。

前述のぶるなびのデータでは提示力の代表値が約 40N であったことから目標提示力を 40N, 提案装置の質量を 100g, $r_1 = 5\text{mm}$ とし, r_2 を 5 から 1mm まで 1mm ずつ減らしたときの必要な錘の質量を以下に示す。

図 10: 目標提示力 40N 達成に必要な錘の質量 ($r_1 = 5\text{mm}$ 固定)

次にこの条件において目標とする力を提示可能かを確認するために周波数ごとの $|\Delta x|_{peak} - |x_M|_{peak}$ の値を計算し、この値を ΔX_{margin} と定義する。以下にそのグラフを示す。

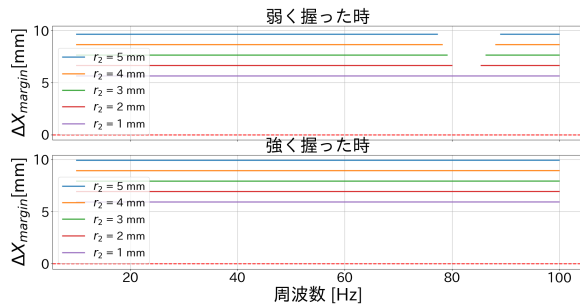


図 11: 動的に質量を最適化した場合の ΔX_{margin} ($r_1 = 5\text{mm}$ 固定)

例示したどの組み合わせのギヤ比においても変位マージンの値は正となり、刺激を提示可能な部品の組み合わせであることが示された。また、装置を弱く握ったときのグラフに欠損があり、これはこの区間では目標刺激量を出力できないことを示している。

3. 提案機構のシミュレーション

次に提案機構での皮膚変位と皮膚への刺激量をシミュレーションする。装置質量=100g, $f=60\text{Hz}$, 図 10 の試算結果より、60Hz において約 40N を提示可能で、かつ現実的な部品構成として $m=10\text{[g]}$, $r_1=r_2=5\text{mm}$ を選択し、シミュレーションを行うと以下のような波形が得られる。

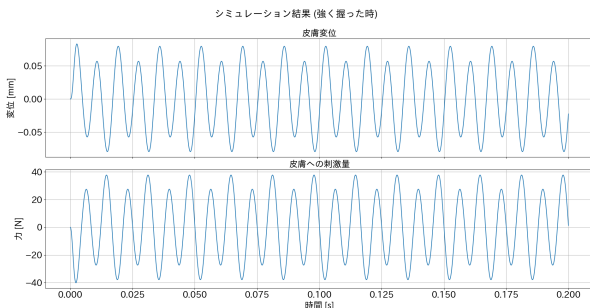


図 12: 強く握ったときの皮膚変位・刺激量シミュレーション

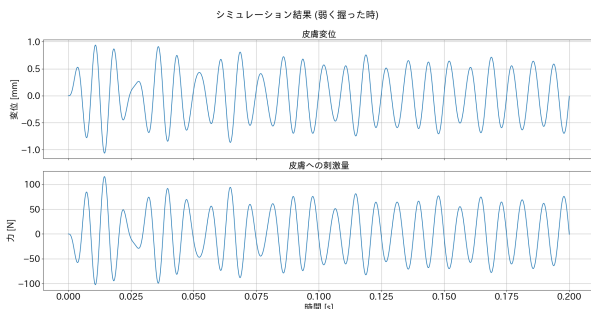


図 13: 弱く握ったときの皮膚変位・刺激量シミュレーション

4. 考察

本稿の実測データの解析とシミュレーションによって、装置を弱く握った際の刺激量は装置を強く握ったそれに比べ小さいか非対称振動刺激として認識できなかった。そのため、まずデバイスとしてマスの振動を皮膚に伝えるには使用者にある程度の力で把持することが前提となる。図 10 は、固定した半径において目標の 40N を達成するために必要な錘の質量と周波数の関係を示している。この結果から、高周波で駆動するほど、より軽い錘で目標を達成できるという設計上のトレードオフが明らかになった。さらに、 r_2 の値を変化させることで、同じ周波数でも異なる質量の錘で目標を達成できることを示している。これは、錘の質量とギヤ比（半径）を適切に組み合わせることで、広い周波数帯で同一の刺激量を提示できる本機構の設計自由度の高さを示唆している。最終的に、提案した設計値 ($f=60\text{Hz}$, $m=10\text{g}$, $r_1=r_2=5\text{mm}$) で行ったシミュレーション結果（図 12, 13）でも、ぶるなびの解析と同様に、強く握った方が皮膚変位は小さいにも関わらず、提示力は同等レベルを維持しており、入力振動を効率的に伝達できていることが確認された。

5. おわりに

本稿では広帯域な周波数で牽引力錯覚を評価可能な、固有周波数に依存しない振動デバイスを提案した。提案機構の物理モデルを構築し、シミュレーションによってその有用性を検証した。ユーザーの握り方をモデル化することによって実測データからパラメータを同定し、実際に皮膚へ伝わる刺激量の試算を行った。その結果、錘とギヤ比の組み合わせで広い周波数で一定の刺激が提示できる可能性を示した。今後は本設計に基づき実機を製作し、物理的な計測によってシミュレーションの妥当性を検証する。さらに、完成したデバイスを用いて、これまで困難であった低周波から高周波にわたる広帯域な周波数での牽引力錯覚に関する心理物理実験を行い、錯覚生起に最適な周波数帯の解明を目指す。

参考文献

- [1] Tomohiro Amemiya and Hiroaki Gomi. Distinct pseudo-attraction force sensation by a thumb-sized vibrator that oscillates asymmetrically. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pages 88–95. Springer, 2014.
- [2] 雨宮智浩, 安藤英由樹, and 前田太郎. 非接地型力覚提示装置を中空で把持したときの効果的な牽引力錯覚の生起手法. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, 11(4):545–555, 2006.