



偏加速度振動による力覚生起時の皮膚計測

Measurement of Skin under Virtual Force Illusion Caused by Asymmetric Acceleration Vibration

金子征太郎¹⁾³⁾, 中村拓人²⁾³⁾, 梶本裕之¹⁾

Seitaro KANEKO, Takuto NAKAMURA, and Hiroyuki KAJIMOTO

1) 電気通信大学 (〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {kaneko・kajimoto}@kaji-lab.jp)

2) 東京工業大学 (〒 152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1, nakamura.t.by@m.titech.ac.jp)

3) 日本学術振興会 (〒 102-0083 東京都千代田区麹町 5-3-1)

概要: 偏加速度振動している振動子を把持することで牽引力を知覚する錯覚が知られている。これまで振動子に入力する波形の最適化や皮膚変形のモデル化などにより、現象について調査が進められてきた。しかし、本研究の発生原因は未だに解明されていない。本研究では、力覚知覚時の皮膚変形を分布的にカメラ計測することで、現象生起に必要な皮膚変形特徴を調査する。発見した特徴量をもとに、現象の発生原因を考察する。

キーワード: 疑似力覚, 皮膚計測

1. はじめに

偏加速度振動とは、一方向の短時間かつ速い加速度の後に、逆方向の長時間かつ遅い加速度の移動を繰り返す振動である [1]。偏加速度振動している物体を把持すると、速い加速度方向に牽引力を知覚する現象が知られている [2]。本現象は従来の接地装置による物理的な力を提示してきた手法と比較して、非接地で小型な装置によって力覚提示が可能となり、VR 体験における触覚フィードバック [3] や歩行ナビゲーション [4] などへ応用されている。

本手法による応用先は今後も広がると考えられ、より効率的な力覚提示の手法が期待される。効率的な力覚提示のために、振動子に入力する波形の最適化が複数行われている [5, 6, 7] が、アクチュエータが研究ごとで異なるため、発見された最適波形を利用するには研究で使用したアクチュエータを用意する必要がある。アクチュエータ毎の特性を考慮し、加速度センサによって入力波形を補正する取り組みも行われている [8]。こうした取り組みにより提示振動の最適化は実現された。しかし、根本的な現象の発生原因に関する確たる実験などは行われていない。今後の発展を考えれば、現象の発生原因を特定することで、より効率的な波形や、発見した特性を利用した振動刺激以外を用いた新たな力覚提示手法提案も考えられる。

これまでの研究においては、本現象の発生原因は解明されておらず、考察のみ行われている。雨宮ら [1] は「知覚の非線形性」の関連を考察している。「知覚の非線形性」とは変化には反応しづらいという知覚特性である。本現象においては、方向による加速度の差によって、瞬間的な強い加速度が敏感に知覚され、牽引力として知覚された可能性がある。また、雨宮ら [1] は次の候補として、「継時マスクング」

を上げている。継時マスクングとは時間的に近接した 2 つの刺激があるときに、強い刺激によって、弱い刺激を感じにくくなる特性である。本現象においては短時間の強い加速度が長時間の弱い加速度をマスクングしてしまい、強い方の刺激のみを知覚し続けたため、牽引力として知覚した可能性がある。また、Culbertson ら [7] は指皮膚の非対称な変形が原因と仮定し、振動子と皮膚のモデル化により最適な入力波形の検討を行ったが、実際に皮膚変形を計測しておらず、仮定の妥当性も示されていない。

上記のように、これまでの研究では本現象の発生原因を特定する確たる実験などは行われていない。そこで、本研究では現象の発生原因解明の初期段階として、力覚生起中の皮膚計測を行う。これまで、偏加速度振動している振動体を把持した指皮膚は、振動子と同様な振動をしていると考えられてきたが、皮膚の微小なすべりや接触部分と非接触部分の境界部分の皮膚歪みなどの関連も考えられる。よって、本研究では高速カメラで把持指皮膚を撮影することで、指皮膚の分布的な変形を計測する。本論文ではまず、把持指を同一画角に収める光学系を搭載した振動装置を実装し指皮膚変形の撮影環境を構築する。次に、実装した振動装置で牽引力錯覚が発生することの確認し、その際の把持指の皮膚変形を構築した光学系と高速カメラを用いて計測する。

2. 実験

2.1 指皮膚計測装置

本研究では偏加速度振動物体を把持による力覚知覚時の皮膚変形計測を行う。2 本の把持指を同時に撮影するために、図 1 のような装置を実装した。装置はアクリルケース内にミラーを 45 度で 2 枚配置し、ケース把持時に 2 本の把

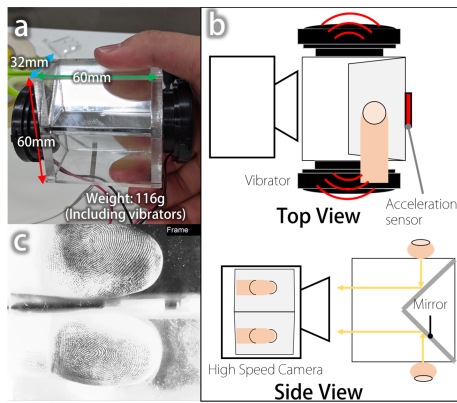


図 1: 開発した指皮膚計測装置。(a) 装置外観 (b) 上面と側面図 (c) 撮影結果例

持指を同一画角に収めた。アクリルケースの両端に振動子 2 個 (Acoupe Lab Inc., Vibro Transducer Vp210) を搭載させ、アクリルケースを偏加速度振動させる。振動子は PC からのオーディオアンプ経由の信号で駆動させる。この際の指皮膚変形をミラーを通じて外部に設置した高速カメラによって撮影する。また、アクリルケースの振動振幅を計測及び統制するために、加速度センサを取り付けた。

2.2 実験 1: 牽引力錯覚生起の調査

作成した装置を把持した状態で偏加速度振動を提示した際に、牽引力錯覚が知覚可能か調査した。

2.2.1 方法

振動に使用した波形は正非対称・負非対称なノコギリ波、正弦波の 3 種類で、周波数は 50,60,70Hz の 3 種類とした。振動加速度は 47m/s^2 になるよう事前に各条件で調整を行った。実験中は被験者は閉眼し、装着したヘッドホンからホワイトノイズを提示された。被験者は利き手の親指と人差し指で振動装置を把持し、体の前面で保持した。把持の際には人差し指が床側とし、床と平行になるように把持させた。また把持時には鏡面が体の左側に来ることとした。振動を 1 秒間提示後、体の前方、後方どちらに力覚を感じたか強制 2 択で回答した。このとき振動は繰り返さず 1 回のみ提示された。各条件の試行を 3 回繰り返し実施したため、総試行数は 27 試行 ($=3 \times 3 \times 3$) であった。試行の順序はランダムで実施した。実験は 10 分程度で終了した。被験者は 7 名で、この内左利きが 2 名であった。

2.2.2 結果

図 2 に結果を示す。グラフ縦軸は知覚した力覚が体の前方方向と回答した割合を示し、横軸に各条件をプロットしている。黒点は全被験者平均、エラーバーは標本分散を示す。これより、正非対称ノコギリ波は前方、負非対称ノコギリ波は後方と回答する傾向があることが読み取れる。チャンスレートの 50% を基準とした Wilcoxon の符号順位和検定を行った結果、60Hz の非非対称ノコギリ波を除いた正非対称ノコギリ波、負非対称ノコギリ波の全周波数に対して有意な差が見られた。また、60Hz の非非対象ノコギリ波は $p < 0.1$ で有意傾向が確認された。この結果より、本装置に

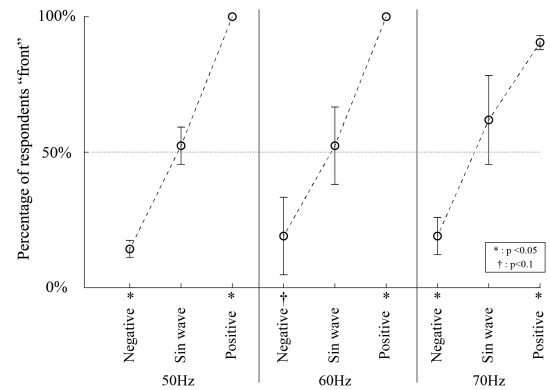


図 2: 偏加速度入力時の力覚を前方と回答した割合。各点は全被験者平均値、エラーバーは標本分散を示す。

対し正非対称、負非対称ノコギリ波を入力した際にそれぞれ前方向、後ろ方向の牽引力錯覚を生起可能であることが明らかになった。

2.3 実験 2: 偏加速度振動提示時の皮膚ひずみ計測

実験 1 の結果より本装置に対して偏加速度振動を入力した際に牽引力錯覚が生起し、正弦波を入力した際には錯覚が生起しないことが明らかとなった。この結果を踏まえ、実験 1 で使用した力覚生起時、非生起時の振動に対して皮膚ひずみ計測を行い、牽引力錯覚に必要な皮膚ひずみ特微量の調査を行う。

2.3.1 実験方法

実験は作成した装置を把持した際の皮膚ひずみをハイスピードカメラ (MEMRECAM Q2m,nac) によって撮影することで行われた。撮影速度は 2000fps で撮影時間は 1.6 秒であった。使用する振動、周波数、振動加速度は実験 1 と同様とした。全 9 条件に対して 3 回繰り返し撮影を実施したため全 27 動画記録を実施した。計測前に指先に対して黒色インクを塗布した。これは後に行う画像処理時にマーカーの役割を果たす。被験者は実験 1 と同様、装置を利き手人差し指と親指で把持し体の前面で保持した。把持する際人差し指が床面に来るように指示を行った。カメラに対して鏡面が垂直になるよう把持位置を調整し、床に指が接触しないよう空中にて保持した。計測は振動が提示された状態で行った。

2.3.2 解析方法

指先の皮膚ひずみ計算方法は主に Delhaye ら [9] の手法を参考とした。以下では本論文で使用した解析方法に関して示す。指先の皮膚ひずみの空間的変化の取得はコンピュータビジョン技術の一つであるオプティカルフローを用いて取得した。まず撮影されたカラー画像をモノクロにし、計測対象となる領域を手動で設定した。次に追跡するための点を Shi & Tomasi [10] の手法を用いて算出した。このときトラッキング点の決定はセンサ記録が開始されたフレームにおいて行われた。その後点群のトラッキングを Lucas Kanade's algorithm [11] を用いて行った。これによりサブピクセル精度でのトラッキングが可能となる。トラッキング

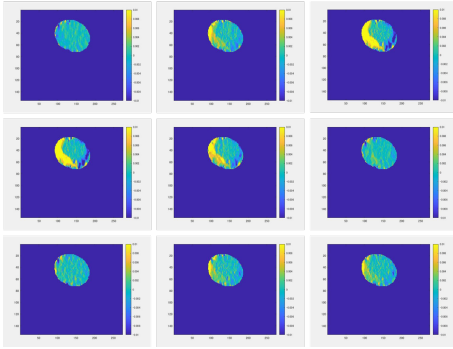


図 3: 50Hz の負非対称波形を入力した際の空間的な皮膚歪み発生パターン。左上から右下にかけて時間変化し、振動一周期を 9 分割して示している。

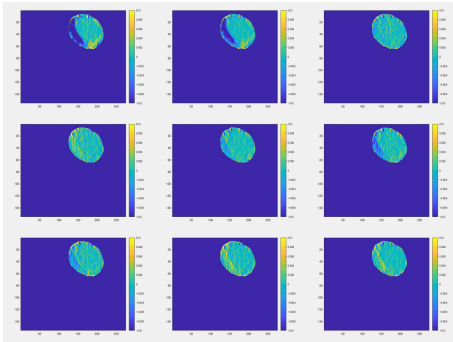


図 4: 50Hz の正非対称波形を入力した際の空間的な皮膚歪み発生パターン。

点を決定したフレームにおいて、特徴点を用いたデレネー三角形分割を計算した。この分割に基づき、初期フレームを基準とした各フレームにおけるグリーンラグランジュひずみを計算した。本稿では振動方向に対して水平方向となる X 軸（指長軸）方向ひずみのみを抽出することとする。各メッシュ重心点上に配置されたひずみ量を再度画像フレームと同一の直交座標系上に補間して配置する。その後、歪の時間的な変化を抽出するため、指先端付近の 1 点をサンプル点として定義し、その点におけるひずみの時間的な変化を抽出した。これらの特徴点トラッキング、ひずみ計算はすべて Matlab(Matlab 2019b, The MathWorks, Inc., USA) を用いて行われた。

2.3.3 結果

図 3,4,5 に 50Hz における波形ごとのひずみ変化を振動の一周期分のフレーム区間を 9 分割し画像として示した。このとき、皮膚に対して振動を提示していない状態を計測開始点としていないため、色として表現される歪みの大きさはここでは大きな意味を持たず、歪みの時間的な変化、及び各フレームにおける相対的な違いにのみ意味があることに注意されたい。なお、正方向の歪みは引張、負方向の歪みは圧縮を示す。

これより、すべての波形条件において指先端部の近位部及び遠位部において指形状に沿った歪みが発生し、指の近位及び遠位で対照的に生起することが分かった。例えば指先端遠位部が圧縮状態の場合は指先端近位部が引張状態に

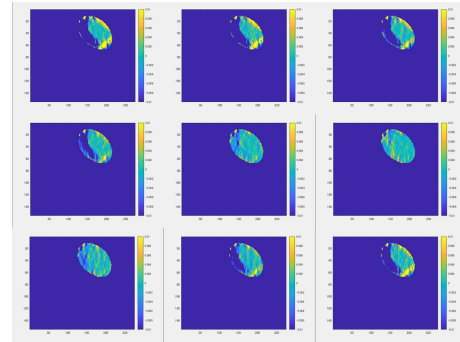


図 5: 50Hz の正弦波を入力した際の空間的な皮膚歪み発生パターン。

なっていることが観察される。対して指中央部においては大きな歪みは発生しないことがわかる。さらにこれらのひずみの発生領域はすべての波形においておおよそ同じ面積を占めていることがわかる。次にノコギリ波と Sin 波のひずみの時間的な発生量を比較すると、ノコギリ波提示時のほうがひずみ発生時間が長いことが観察される。

次に、ひずみの時間的な変化をより詳細に検討するため、指先端部の一点に着目し、時間的な変化をグラフに示した。図 6 に 50Hz の各波形における時間的な変化を表す。先程の結果と同様、計測開始点が皮膚ひずみの基準点となっていないことから縦方向の原点はここでは意味を持たない。なお正方向の歪みは引張、負方向のひずみは圧縮を示す。

ノコギリ波を入力した際の歪の時間的な変化に着目すると、正非対称波形入力時には負方向歪、つまり皮膚の圧縮が強く発生し、対して負非対称波形入力時には正方向歪、つまり皮膚の引張が強く発生していることが明らかとなった。これら 2 つの波形はお互いの波形を上下反転させていることが観察される。また Sin 波を入力した際には Sin 波の時間的なひずみ変化が発生していることが示された。なお、歪み波形の周波数は入力周波数と同一である 50Hz であることが明らかとなった。

3. 考察

今回発生した振動する板上で計測された空間的なひずみのパターンは、平板上をなぞった際のひずみパターンと類似している。Delhaye ら [9] は平板を指上で前後左右に動かした際の皮膚ひずみを計測している。その結果、板が体前方に動き始める際には指先端遠位部が圧縮され、近位部が引張される。また板が体後方に動き始める際には先端遠位部が引っ張られ近位部が圧縮されることを示している。我々の計測結果もこの結果と同様の傾向、つまり指先端部と指先近位部において対照的なひずみが発生することを示している。これらのことは板上における皮膚の滑り始めの状況が板振動時にも発生していることが示唆している。

時間的な歪み変化のパターンに着目すると、疑似力覚が発生する際には Sin 波と異なり一方向に対してひずみが偏った波形が表れ出た。本波形は Culbertson ら [7] によって示された偏加速度振動をモデル化された皮膚に対して入力し

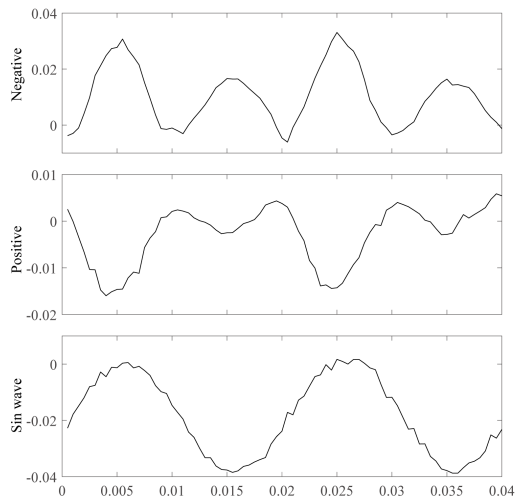


図 6: 指先端部における各波形における歪みの時間変化。上より負非対称波形, 正非対称波形, 正弦波での結果を示す。

実際の皮膚変位波形と類似していることがわかる。例えばある一方向に対して変位が大きく発生し、その後小さな振動を伴ってまた新たに大きな変位が発生する部分において非常に類似度が高い。ただし本研究ではひずみを示しているため、彼らの研究の結果である変位ではない。しかしこの変位が皮膚固着部分において起こっていること、及び皮膚の非接触部分が自由に動くことを考えると、変位によって発生した歪みが同様の波形を示すことは自然なものとして受け入れることが可能となる。将来的には板上で固着されている領域の変位がモデルでの変位と一致していることを確認する必要がある。

これらの空間的、時間的ひずみパターンの発生を統合的に検討すると、牽引力錯覚を発生させるために必要な条件は大きく2点あることが示唆される。つまり、1) 接触部と非接触部の境界部において対照的な歪み(拡張・収縮)を発生させること、2) 発生される歪の時間的な変化が非対称的であることである。この条件がこれまでの偏加速度振動による牽引力錯覚発生装置に対して生じているかに関してはそれぞれの事例に対して皮膚変形計測を伴う調査を実施する必要がある。

4. おわりに

本研究では偏加速度振動している振動子を把持した際に発生する牽引力錯覚の発生機序を明らかにすることを目的として、振動提示時に皮膚観測が可能な装置を使用した時空間的な皮膚変形計測を行った。結果、振動提示時に皮膚は空間的に対象的なひずみを持って現れ、時間的にひずみの偏りを持つことが明らかとなった。次のステップとして、入力する波形振幅及び皮膚接触面積を変化させた状況での計測を行い、より詳細な牽引力錯覚発生要因の検討を行う。
謝辞 本研究は JSPS 科研費 19J02096, 20J23128 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 雨宮智浩, 安藤英由樹, and 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(「触・力覚情報の処理と呈示」特集),” *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] 田辺健, 雨宮智浩, 遠藤博史, and 井野秀一, “非対称振動刺激による牽引力錯覚の研究動向,” *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, vol. 25, no. 4, pp. 291–301, 2020.
- [3] I. Choi, H. Culbertson, M. R. Miller, A. Olwal, and S. Follmer, “Grability: A wearable haptic interface for simulating weight and grasping in virtual reality,” in *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, (New York, NY, USA), p. 119–130, Association for Computing Machinery, 2017.
- [4] T. Amemiya and H. Sugiyama, “Orienting kinesiologically: A haptic handheld wayfinder for people with visual impairments,” *ACM Trans. Access. Comput.*, vol. 3, Nov. 2010.
- [5] T. Amemiya and H. 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*, pp. 88–95, Springer, 2014.
- [6] J. Rekimoto, “Traxion: A tactile interaction device with virtual force sensation,” UIST '13, (New York, NY, USA), p. 427–432, Association for Computing Machinery, 2013.
- [7] H. Culbertson, J. M. Walker, and A. M. Okamura, “Modeling and design of asymmetric vibrations to induce ungrounded pulling sensation through asymmetric skin displacement,” in *2016 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. 27–33, 2016.
- [8] T. Tanabe, H. Yano, H. Endo, S. Ino, and H. Iwata, “Pulling illusion based on the phase difference of the frequency components of asymmetric vibrations,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 26, no. 1, pp. 203–213, 2021.
- [9] B. Delhay, A. Barrea, B. B. Edin, P. Lefèvre, and J.-L. Thonnard, “Surface strain measurements of fingertip skin under shearing,” *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 13, no. 115, p. 20150874, 2016.
- [10] J. Shi *et al.*, “Good features to track,” in *1994 Proceedings of IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 593–600, IEEE, 1994.
- [11] B. D. Lucas, T. Kanade, *et al.*, “An iterative image registration technique with an application to stereo vision,” Vancouver, British Columbia, 1981.