

モータを用いた非対称回転による多指への疑似力覚呈示（第二報） —生起疑似力覚の定量化—

Pseudo Force Presentation to Multiple Fingers by Asymmetric Rotational Vibration Using a Motor (II) - Quantification of occurring pseudo force sense -

櫻木 怜（電通大） Yem Vibol（電通大） 梶本 裕之（電通大）

Rei SAKURAGI, University of Electro-Communications, sakuragi@kaji-lab.jp
Vibol YEM, University of Electro-Communications
Hiroyuki KAJIMOTO, University of Electro-Communications

It is known that a pseudo force sense as if pulled in one direction is generated by presenting an asymmetrical vibration stimulus with different acceleration in round trip. In this research, we utilized similar phenomenon using asymmetric rotational vibration of DC motor to present pseudo force sensation to multiple fingertips. In this paper, we investigated frequency characteristics of this phenomenon with two fingers; thumb and index finger, with grasping posture, showing that around 30Hz vibration is optimal. We also conducted an experiment to see equivalent physical force that this illusion generates, and it showed 10 to 30 gram force, with large variance among participants.

Key Words: DC motor, Grasping, Master hand, Multiple fingers, Pseudo force

1. はじめに

人が物体に触れた際に感じる触力覚は物体の硬さや大きさ、質感の手がかりとなる。この触力覚をバーチャルリアリティ（VR）環境において再現する試みは多岐にわたる。ユーザがバーチャルな物体に触れた際、実際にユーザの指ないし把持物を物理的に駆動することで手指への触力覚を生じさせる手法は、外骨格型[1]や把持型[2][3][4]など、主にロボティクスの技術の延長で研究開発されているが、これらは装置が大型で複雑化しやすいといった問題を抱えている。

指先の手掌部全体に振動子を配置し、振動刺激を呈示するグローブ型[5][6][7][8]デバイスは、触力覚のうち狭義の触覚（皮膚感覚）、それも振動感覚のみ呈示することで装置のウェアラブル化を図っているが、力覚がないために例えば接触対象の形状認識に多大な時間を要するという問題があった。また皮膚感覚のうち圧覚を呈示する手法も多数提案されているが[9][10][11][12]、複数のモータか、ベルトやリンク機構などの複雑な機構を必要とするものであった。

通常、力覚呈示を行うためには装置を接地させ、アクチュエータを用いてユーザとのインタフェースとなる部分に反力を与えることが必要となる。しかし人間の知覚特性を利用することにより、往復で加速度の異なる非対称振動を呈示すると一方向に引っ張られている感覚が知覚され、疑似的に力覚を再現できることが知られている[13][14][15][16][17]。コンパクトな振動装置で力覚の手がかりを与える有力な手段であるが、これまでこの現象は、人が振動子を「把持」した状態でしか観察されておらず、指先に装着して VR 用のグローブにする試みは無かった。

これに対して Yem らは、回転型の DC モータを指先に搭載した際に往復で加速度の異なる非対称な回転を呈示することで疑似的な力覚が生起することを発見した[18]。この現象は従来の振動による疑似力覚呈示に近い現象と考えられるが、振動子を把持せず指に装着する状態でも感じることができる。このため VR 用のグローブのために利用可能であると考えられる。

本稿ではこの、DC モータの非対称回転による疑似力覚現象について、実際の VR 環境における物体の把持の状況を想定し、指 2 本での把持姿勢の際の疑似力覚呈示における適切なモータ振動の周波数の検証を行った。

また、その結果より疑似力覚を安定して感じる鋸波の周波数を選定し、その際に生起する疑似力覚の大きさを定量化するために測定を行った。

2. 装置概要

本装置の外観を図 1 に示す。

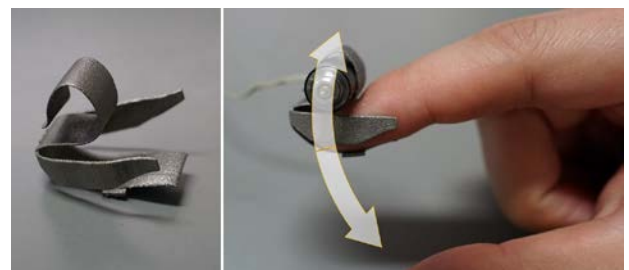


Fig. 1 Proposed device for presenting a pseudo force (left) and orientation of the pseudo force presented to the finger (right)

疑似力覚呈示装置は DC モータ(Maxon, 118396)、モータ固定サック、アンプ(Muse, M50)、PC で構成される。DC モータを

指先に固定するためのサックは 3D プリンタで出力したステンレス製金属で、指先に対してピッチ方向にモータ軸が回転する方向に装着することができる。この時、ユーザに呈示可能な疑似力覚はピッチ軸方向となり、指にとっては指腹-指背方向の力として感じられる (図 1)。

予備実験により指先方向に対してモータ軸の先端を左側直交する向きに向けた状態で装着した際に DC モータにのこぎり波、逆のこぎり波を入力した場合、指背、指腹方向に疑似力覚を生じることを確認した。

3. 実験 1

3.1 実験概要

DC モータを用いてユーザに疑似力覚を生起させる際に、呈示する刺激の適切な周波数を調査するため実験を行った。親指と人差し指に同時に刺激を呈示した際に感じられる疑似力覚の方向の組み合わせを用意し、被験者にそれを回答させた。

3.2 実験条件

実験は研究室内のメンバ 8 名 (男性 8 名, 22~28 歳, 全員右利き) を被験者として行った。呈示刺激には往復で加速度の異なる非対称な振動刺激として、波形生成ソフト(Max/MSP)でのこぎり波を生成し用いた。振動刺激の周波数は 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80Hz とし、振動刺激の印加電圧値は 6, 12V とした。2 本の指にそれぞれ独立した振動刺激を呈示するため、生起が期待される疑似力覚の方向の組み合わせは 4 通り存在する (図 2)。以降、両指に指腹方向への疑似力覚呈示を行う条件を条件 1、親指に指腹方向、人差し指に指背方向の疑似力覚呈示を行う条件を条件 2、親指に指背方向、人差し指に指腹方向の疑似力覚呈示を行う条件を条件 3、両指に指背方向への疑似力覚呈示を行う条件を条件 4 とする。

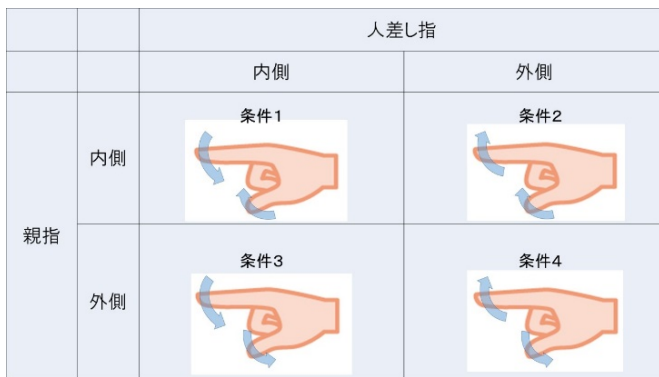


Fig. 2 Combination of force sensations for the thumb and index finger

3.3 実験手順

被験者は右手の親指と人差し指にデバイスを装着し、DC モータからの音や外部ノイズの影響を抑えるためノイズキャン

セリングヘッドホンを用いて聴覚をマスクした。

各被験者はキーボード操作によって刺激呈示の開始と回答が可能であり、各刺激は最長で 10 秒間呈示された。被験者は呈示された刺激によって知覚した疑似力覚の組み合わせを図 2 に示した 4 条件もしくは力覚なしとして回答し、刺激の呈示は回答を行った時点で終了した。

順序効果を考慮し、被験者ごとに各条件を 2 回ずつ、ランダムな順番で計 128 試行測定を行った (疑似力覚 4 条件×周波数 8 条件×電圧値 2 条件×2 回)。

3.4 実験結果および考察

全被験者の各周波数における疑似力覚の知覚の組み合わせの正答率をまとめたグラフを図 3 に示す。グラフの横軸は各周波数を、縦軸は回答の正答率を表している。

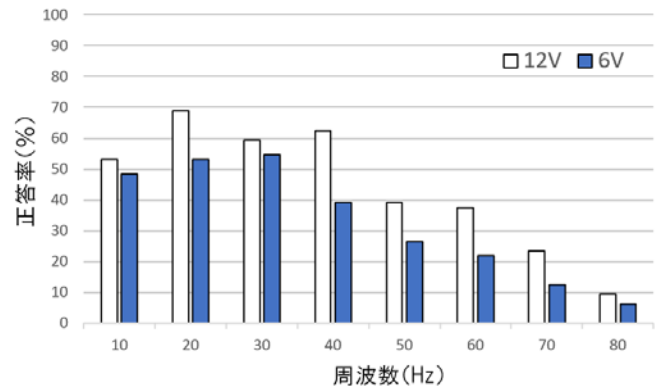


Fig. 3 Correct-response rate at each frequency

グラフより、30Hz 以下の周波数において比較的高い正答率となる傾向が見られた。また、40Hz の振動刺激を呈示した際には呈示刺激の強度によって正答率に差が見られた。加えて、低い周波数の振動刺激が呈示された際、より強く疑似力覚が生起したという内観報告がほぼすべての被験者から得られた。

この結果をもとに、50Hz 以上の周波数を取り除いた 12V における各刺激呈示条件におけるユーザの回答の割合をまとめたものを表 1 に示す。

Table 1 Response rate (%) at an applied voltage of 12 V below a frequency of 50 Hz

		回答				
		条件 1	条件 2	条件 3	条件 4	力覚なし
呈示刺激条件	1	71.88	7.81	6.25	3.13	10.94
	2	17.19	62.50	0.00	6.25	14.06
	3	17.19	3.13	59.38	6.25	14.06
	4	7.81	12.50	26.56	42.19	10.94

表中の橙色の項目は呈示刺激と被験者の回答が一致した試

行の割合を示す。これらの組み合わせのうち、条件 1 においての一致回答率が最も高く、条件 4 が最も低い結果となった。これは、指を屈曲する側の刺激をより明瞭に感じ、指を伸展する側の刺激を感じにくかったと解釈される。この一つの理由は、今回完全な脱力姿勢ではなく、親指と人差し指を平行にした恥の姿勢を取らせており、これによって指の伸展筋がより活動していたことにより、伸展方向の感度が相対的に鈍くなっていた可能性が考えられる。また、指を進展させる外力は指を屈曲させる外力よりも日常的に多く体験しており、逆にこのために指を屈曲させる外力を日常とは異なる体験として鮮明に知覚した可能性もある。

一方で、条件 1 に対する条件 4、条件 2 に対する条件 3 といった両指への呈示刺激が逆となる組み合わせの回答率は非常に低く、被験者は少なくとも片方の指には期待された方向への疑似力覚が生起していたと考えられる。

4. 実験 2

4.1 実験概要

本実験では DC モータを用いて疑似力覚を生起させた際に実際にユーザが感じる疑似力覚の大きさを定量化する。本実験では鋸波により生起する疑似力覚を基準刺激とし、親指と人差し指の 2 本の指を用いた把持動作における指の指背方向への疑似力覚の大きさを、錘を用いて測定した。

4.2 実験セットアップ

振動子を指先に固定するため、実験 1 に利用した指先型グローブを用いた。錘を比較刺激として提示する際には滑車と紐を用いて 2 本の指のそれぞれの指腹部に荷重が掛かるようにした。実験装置の外観を図 4 に示す。

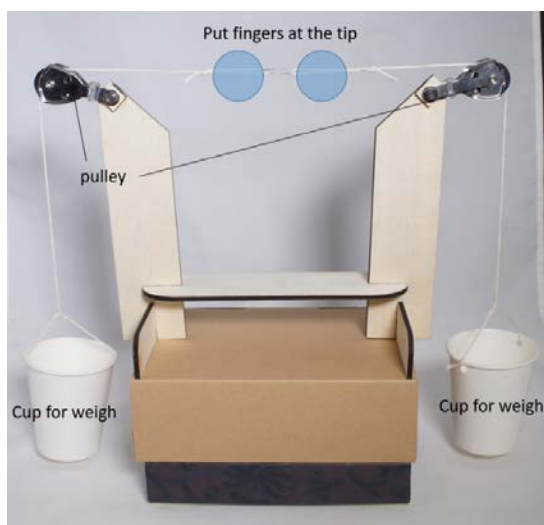


Fig. 4 Experimental apparatus

4.3 実験条件

実験は研究室内のメンバ 8 名（男性 6 名、女性 2 名、21～

28 歳、全員右利き）を被験者として行った。基準刺激には実験 1 で使用したもののうち、最も安定した結果が得られた刺激として 30Hz のものを用い、振動刺激の印加電圧値は 12V とした。本実験では両指に指背方向への疑似力覚呈示を行う組み合わせ条件を提示し、被験者に指先に感じる疑似力覚の強さが錘と比べて大きい小さいかを回答させた。実験手順
実験は以下の 3 つの手順に分けて行われた。

1. 指先型グローブを装着し、基準刺激として疑似力覚を覚える
2. 指先型グローブを外し、錘を指先に掛けて疑似力覚と比較する
3. どちらの刺激をより強く感じたか回答する

実験開始時の錘の重さは予備実験より 32 g とし、以降の重さは被験者の回答をもとに PEST 法(Parameter Estimation by Sequential Testing)に従って決定した[19]。PEST 法は以下の手順によって次の試行時の刺激強度を決定する。

1. 最初のステップの刺激強度は実験者が任意に決めることができる。
2. 刺激強度の移動の方向が反転する度にステップサイズを半分にする
3. 方向が変わらない場合はそれ以前と同じだけ変化させる
4. 3 回あるいはそれ以上連続して同じ方向に移動した場合はステップサイズを倍にし、ステップサイズが大きくなりすぎないように上限を定めておく
5. 2 回連続して同じ方向に移動した場合は状況に応じてステップサイズを倍にする、あるいは維持する。直近の移動方向の反転の直前のステップサイズがその前の倍になっていたら、このときに倍にする。そうでなかった場合はそれまでのステップサイズを維持する。
6. ステップサイズがあらかじめ決めておいた値よりも小さくなった時測定を終了する。その時の刺激強度を閾値とする。

今回の実験では最小ステップサイズを 1g とし、ステップサイズがこれを下回った場合の刺激強度を求めた。

4.4 実験結果

各試行における全被験者の疑似力覚を知覚している重さをまとめたグラフを図 5 に示す。グラフの横軸は各試行回を、縦軸は被験者が感じた疑似力覚の大きさを表している。

謝辞

本研究は JST-ACCEL 「身体性メディア」プロジェクトの一環として行われた。

参考文献

- [1] K Sato, K Minamizawa, N Kawakami, S Tachi: Haptic Telexistence, ACM SIGGRAPH, Emerging Technology Session, Article No.10, 2007.
- [2] S. Kim, S. Hasegawa, Y. Koike, M. Sato: Tension based 7-DOF force feedback device: SPIDAR-G, Transactions on Control, Automation, and Systems Engineering, Vol. 4 No. 1, pp. 9-16, 2002.
- [3] Novint Falcon, http://home.novint.com/products/novint_falcon.php
- [4] Haption, <http://www.haption.com>
- [5] CyberTouch:cyberglovesystems.com:
<http://www.cyberglovesystems.com/?q=products/cybertouch/overview>
- [6] Jonatandsiulmes, J. M., García, A., & Oliver, M. Identifying 3D Geometric Shapes with a Vibrotactile Glove, IEEE Computer Graphics and Applications, Volume 36, Issue 1, pp. 42-51, 2014.
- [7] Pabon, S., Sotgiu, E., Leonardi, R., Brancolini, C., Portillorodriguez, O. & Bergamasco, M. A data-glove with vibro-tactile stimulators for virtual social interaction and rehabilitation. Presence, pp.345-348, 2007.
- [8] Kenta Tanabe, Seiya Takei, Hiroyuki Kajimoto: The Whole Hand Haptic Glove Using Numerous Linear Resonant Actuators. In Proceedings of IEEE World Haptics Conference, 2015.
- [9] Kouta Minamizawa, Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami and Susumu Tachi: Wearable Haptic Display to Present Gravity Sensation - Preliminary Observations and Device Design. In Proceedings of IEEE World Haptics Conference 2007.
- [10] Go Inaba, Kinya Fujita: A Pseudo-Force-Feedback Device by Fingertip Tightening for Multi-Finger Object Manipulation, In Proceedings of EuroHaptics 2006, pp475-478, 2006.
- [11] Claudio Pacchierotti, Gionata Salvietti, Irfan Hussain, Leonardo Meli, Domenico Prattichizzo: The hRing: a Wearable Haptic Device to Avoid Occlusions in Hand Tracking. In Proceedings of IEEE Haptics Symposium 2016, pp. 134-139, 2016.
- [12] Jeremy D. Brown, Mary Ibrahim, Elyse D. Z. Chase, Claudio Pacchierotti, Katherine J. Kuchenbecker: Data-Driven Comparison of Four Cutaneous Displays for Pinching Palpation in Robotic Surgery, In Proceedings of IEEE Haptics Symposium 2016, pp147-154, 2016.
- [13] Amemiya, T., and Gomi, H., "Distinct Pseudo-Attraction Force Sensation by a Thumb-Sized Vibration that Oscillates Asymmetrically," In Proceedings. of EuroHaptics 2014, Springer Part II, pp. 88-95, 2014.
- [14] Rekimoto, J., "Traxion: a tactile interaction device with virtual force sensation", In Proceedings of ACM Symposium User Interface Software and Technology (UIST2013), pp. 427-432, 2013.
- [15] Amemiya, T., Ando, H., and Maeda, T., "Virtual Force Display: Direction Guidance using Asymmetric Acceleration via Periodic Translational Motion", In Proceedings of World Haptics Conference 2005, pp. 619-622, 2005.
- [16] Takeshi Tanabe, Hiroaki Yano, Hiroo Iwata : Properties of Proprioceptive Sensation with a Vibration Speaker-Type Non-Grounded Haptic Interface, In Proceedings of Haptics Symposium 2016, pp.21-26, 2016
- [17] Heather Culbertson, Julie M. Walker, Allison M. Okamura: Modeling and Design of Asymmetric Vibrations to Induce Ungrounded Pulling Sensation Through Asymmetric Skin Displacement, In Proceedings of Haptics Symposium 2016, pp. 27-33, 2016.
- [18] V. Yem, R. Okazaki and H. Kajimoto, "Vibrotactile and Pseudo Force Presentation using Motor Rotational Acceleration." In Proceedings of IEEE HapticsSymposium 2016, pp. 47-51, 2016.
- [19] M. M. Taylor and C. Douglas Creelman, PEST: Efficient Estimates on Probability Functions, U. Acoust. Soc. Am. 41, pp.782-787, 1967.

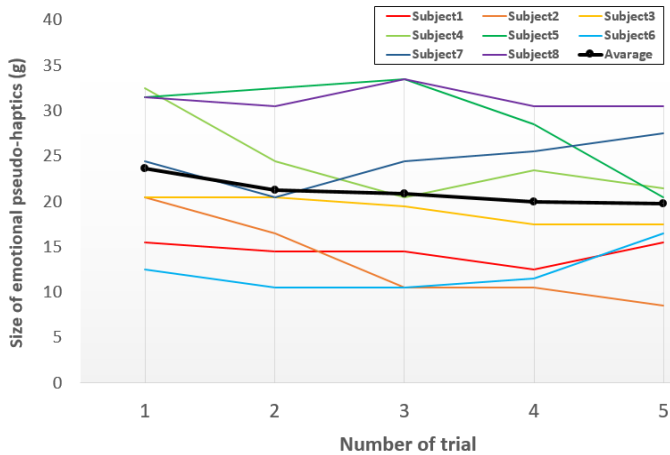


Fig. 5 Results of Experiment 2

グラフより、全ての被験者が疑似力覚の強さを 10g~30g 程度の強さで知覚していることが分かった。実験の回数に従った変化については、全被験者に共通する傾向は見られなかったが、内観報告より、実験の試行が進むにつれて疑似力覚の生起が振動によって曖昧となったという意見が多数見られた。これより、本装置を用いた疑似力覚の提示は短時間での使用が望ましく、長時間の使用はユーザに生起する感覚が曖昧になることが推測される。

5. おわりに

本稿では DC モータを指先に装着するタイプのデバイスを用いて、往復で加速度の異なる非対称回転による疑似力覚現象を用いて多指に疑似力覚を呈示するマスタハンドのための予備的検討を行った。親指と人差し指に対して指腹-指背方向に対して 4 つの疑似力覚呈示の組み合わせ条件を用意し、疑似力覚の生起に適切なモータ振動の周波数の検証を行った。実験の結果、特に 40Hz 以下でユーザは少なくとも一方の指において疑似力覚を期待通りの方向に生起している割合が高かった。この結果をもとに、印加電圧 12V、周波数 30Hz の鋸波によって生起する疑似力覚の強さを錘を用いて定量化する実験を行い、親指と人差し指での把持動作を行う際にユーザがおおよそ 10g~30g 程度の疑似力覚を感じていることが分かった。

今後は手指 5 本による把持姿勢における疑似力覚の呈示や、最適な波形、最適なモータの構造などについての検討を進める。