



複数 LRA を用いた 振幅変調提示における配置密度の検討

Placement density in amplitude modulation presentation with multiple LRAs

藤亘輝¹⁾, 秋葉優馬²⁾, 牛山奎悟²⁾, 溝口泉²⁾, 梶本裕之²⁾

Kouki FUJI, Yuma AKIBA, Keigo USHIYAMA, Izumi MIZOGUCHI and Hiroyuki KAJIMOTO

- 1) 電気通信大学 情報理工学域 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, fuji@kaji-lab.jp)
2) 電気通信大学 情報理工学研究科 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {yuma.akiba, ushiyama, mizoguchi, kajimoto}@kaji-lab.jp)

概要: 直動共振アクチュエータ (LRA) は、比較的小型であるにもかかわらず効率的に振動を提示できる素子として知られているが、提示できる振動周波数が限られるという課題があった。これに対して先行研究では、振幅変調をすることで指先に低周波を知覚させるという手法が知られていた。本研究の目的は、LRA を指先に複数取り付け振幅変調提示を行う際の適切な配置密度を明らかにすることである。実験では振幅変調の有無による指先の振動に対する二点弁別閾の影響を調べた。

キーワード: 指先, 振動提示, 直動共振アクチュエータ, 振幅変調

1. はじめに

VR 空間において物のテクスチャや柔らかさを利用者伝えることは、VR 体験の没入感を高めるうえで非常に重要である。その中でも振動提示は商用で最も広く利用されており、重要な触覚提示手法である。振動は、テクスチャ感覚提示[1],[2],[3]だけでなく、低周波 (5 Hz) を用いた圧覚提示[4]も可能とされている。

こうした多くの振動提示が指一本に対して一つのアクチュエータによる提示を試みているのに対し、指先本来の高い空間解像度に対応した触覚提示も多く試みられている。Kim らは、 piezoアクチュエータを用いた触覚ディスプレイにより、高繊細な触覚提示を可能としている[5]。Ujitoko らは、認識性能を向上させるためには、接触点の密度とカバーエリアの両方が不可欠であるとし、空気圧アクチュエータを採用することで解決した[6]。Shen らは、薄型で低消費電力の高解像度形状変化フィンガーパッドアレイを開発した[7]。しかしながら、これらのデバイスは現時点では個々のアクチュエータを独自に開発する必要がある。また、人は本来指側面まで用いて日常的な作業を行っているが、高解像度触覚提示の試みの多くは指腹の比較的狭い領域に提示することにどまっていた。

我々は、小型の商用の直動共振アクチュエータ (LRA) を用いて指腹だけでなく、指側面も含めた高解像度な触覚提示を行う手法を提案する。

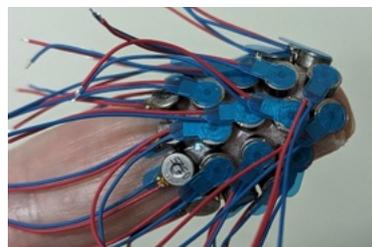


図1. LRA によるマトリクス型指触覚提示のイメージ

本提案は二つの着眼点に基づいている。一つ目は、商用の振動子はすでにかなり小型であるということである。現在、代表的な振動提示素子である LRA は小さいもので直径 6 mm のサイズである。二つ目は、指側面も含めた提示を行うことで十分な触覚提示面積を確保できることである。これらにより、小型 LRA でもマトリクス型の提示が可能であると考えた。従来も複数の LRA を指に搭載する試みは存在するが[8]、4 個程度に留まっており、例えばエッジの形状まで提示することを目的としたものではなかった。

LRA は共振を用いるという原理上、駆動できる周波数が高周波に限定される。これに対して高周波振動を振幅変調することで低周波感覚を提示する手法が知られており、特に駆動周波数が制限されるアクチュエータにおいて有用である。Park らは、振幅変調振動の低周波感覚が、変調周波数が非常に低い場合に増加することを明らかにした[9]。

Alma らは、ディスプレイ上の帯域制限ノイズ、単一正弦波、振幅変調信号の類似性を実際の質感と比較して評価し、振幅変調振動が単一正弦波よりも粗いテクスチャーを再現するのに適していることを示した[10].

本研究は、LRA を用いたマトリクス状の指先振動触覚提示の予備的検討として、上述の振幅変調の手法を用いた際に小型振動子で提示できる二点弁別閾の調査を行った。これにより、複数 LRA を指先に取り付け振幅変調提示を行う際の適切な配置密度を明らかにする。

2. 実験

2.1 実験 1. 二点弁別閾の検証実験

2.1.1 実験概要

本実験の目的は LRA を用いた単純な正弦波振動と振幅変調振動における指腹の二点弁別閾の差異の有無を検証することである。

2.1.2 実験環境

実験環境を図2に示す。実験では、振動子として図2に示す LRA (VG0640001D, Vybionics Inc) を用いた。この振動子は共振周波数が 200 Hz 付近である。正弦波信号および振幅変調信号は、ソフトウェア (Cylinder '74 & MI Max8) により生成し、オーディオインタフェースを介し、ステレオパワーアンプ (FX-AUDIO FX202A/FX36A PRO, North Flat Japan) を通して振動子に加えられた。なお本研究における振幅変調波は次の式 (1) で表される。

$$g(t) = \sin(2\pi f_e t) \sin(2\pi f_c t) \quad (1)$$

ただし、 f_e は原信号の周波数であり、本研究では 4 Hz、32 Hz である。 f_c は振幅変調の搬送波の周波数であり、LRA の共振周波数付近の周波数を用いた (本研究では 200 Hz)。振幅変調波は原理上、原信号の周波数が搬送波によってシフトするため、この信号 $g(t)$ には $f_c \pm f_e$ の周波数が含まれていることになる。指腹と振動子の接着には両面テープを使用した。

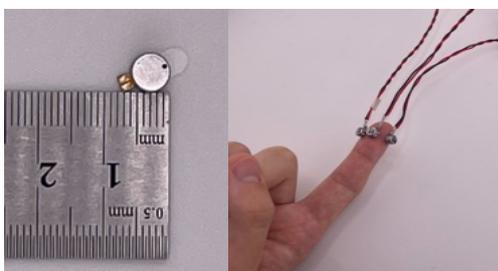


図2. LRA (VG0640001D) と実験環境

2.1.3 実験条件

被験者は 21 から 22 歳までの 8 名 (男性 6 名, 女性 2 名) で行った。被験者は全員右利きであった。

LRA の配置を図3に示す。本実験では、被験者の右手の人差し指にて行った。中央にある LRA が指腹の中央にな

るように配置し、LRA 同士の間隔が 1 mm、2 mm、4 mm の 3 つの条件で行った (LRA の中心間距離は 7mm、8mm、10mm)。

提示した振動は、200 Hz の単純な正弦波、およびそれを搬送波とする 4 Hz、32 Hz の振幅変調波の計 3 種である。振幅は筆者によって十分に振動が感じられる程度に定められ、全ての被験者間で同じ振幅で実験が行われた。



図3. LRA の配置 (画像は 2 mm 間隔)

2.1.4 実験手順

実験は、被験者が椅子に座り、人差し指を宙に浮かせた状態で実施した。まず、LRA を配置する前に、被験者の指先をアルコールで湿らせ、両面テープの固定を強固にする準備を行った。人差し指の指腹が乾燥したことを確認した後、LRA を配置した。LRA が指腹にしっかり貼り付いていることを確認した後、振動提示を行なった。LRA の配置条件につき 3 種類の振動提示を行なった。はじめに、中央、右、左の順に約 1 秒間、1 回ずつ振動を提示した。次に、本実験を行った。実験中は被験者に閉眼するよう指示した。振動提示は、まず中央の LRA で約 1 秒間を提示し、約 1 秒間のインターバルを挟み、次に左右どちらかの LRA で約 1 秒間提示した。この振動提示の後、左右どちらの LRA が振動したかを回答させた。これを 10 セット行なった。この一連の手順を、3 つの配置条件、3 つの振動条件の計 9 条件で行った。なお、10 回の回答セットにおいて左右の選択はランダムに生成した。

2.1.5 実験結果

10 回の回答における、実際に提示した左右の方向と被験者が回答した方向の正答率の平均値と標準偏差を表すグラフを図4に示す。

全ての条件において正答率に顕著な差は見られず、本実験の範囲ではどの条件でも 2 点弁別可能であることが確認された (間隔 : $p=0.061$ 、周波数 : $p=0.729$ 、振動子の間隔と周波数の交互作用 : $p=0.048 < 0.05$)。なお、LRA の間隔が 2 mm、振動が 4 Hz 変調の条件ではやや正答率が下がる結果になった。

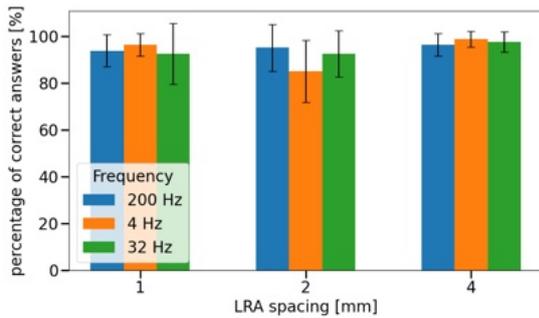


図4. 各条件における正答率を表したグラフ

2.2 実験 2. 指腹への振幅変調振動の知覚評価実験

2.2.1 実験概要

本実験の目的は、LRA を用いた指腹への振幅変調振動の質を評価することである。Haptuator (TL002- 14-A, Tactile Labs) で提示される純粋な低周波振動との類似度を調査し、低周波感をより純粋に提示可能か検証することである。

2.2.2 実験環境

実験環境を図 5 に示す。実験では、振動子として二点弁別閾の検証実験で用いたものと同じの LRA を用い、同様の振動信号生成を行なった。また、単純な低周波振動を提示することができる Haptuator を用いた。それぞれの振動子は振動が伝播しないようクッション材の上に設置している。

本実験では、200Hz の搬送波を用いた振幅変調を行っているが、この搬送波はなるべく知覚しないことが望ましい。このためには、振動が皮膚深部まで伝搬しないようにすることで Pacini 小体の振動を抑える手法が有効と考えられる[11]。図 5 (左) のように細いピン型のアタッチメントをつける事で Pacini 小体の空間加算特性を用いること、さらにこれに合わせて図 5 (右) のようなワッシャを指に取り付けることで指の振動伝搬を抑えることを試みた。

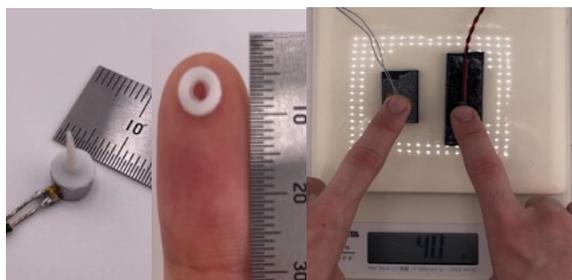


図5. アタッチメント (左) ピン (右) ワッシャと実験環境

2.2.3 実験条件

被験者は 21 から 23 歳までの 10 名 (男性 8 名, 女性 2 名, 左利き 1 名) で行った。

本実験では、被験者の利き手の人差し指で LRA に、もう一方の人差し指で Haptuator に触れるよう指示した。実験条件を表 1 に示す。LRA には装置なし、ピン型の装置

あり (図 5 左) , 及び指腹にワッシャ様の物体 (図 5 右) を両面テープで接着した 3 つの条件と、5 つの振動条件の組み合わせの全 15 条件で実験を行った。実験中はワッシャ様の物体の中心にピン型の装置の先端が来るように指示した。

2.2.4 実験手順

実験は、被験者が椅子に座り、人差し指を宙に浮かせた状態で実施した。まず、被験者に振動子への押下力が 20 g 程度になるよう電子天秤 (KD-320) 上で振動子に触れてもらい、実験中はその押下力で振動子に触れるよう指示した。また、実験中は振動の類似度は振動強度ではなく振動の質で回答するよう指示した。その上で、LRA で提示される 4 Hz, 8 Hz, 16 Hz, 32 Hz の振幅変調波と、ハプチュエータで提示される 4 Hz, 8 Hz, 16 Hz, 32 Hz の単純正弦波のそれぞれで、振動強度が同じ程度に被験者が知覚するよう、Haptuator の振動強度を調整した。この調整では振動子の上に装置がない状態で行い、全ての装置条件でこの振動強度を用いた。

表1. 実験条件

条件	ピンの有無	ワッシャ有無	振動の種類
1	無し	無し	200 Hz
2	有り	無し	200 Hz
3	有り	有り	200 Hz
4	無し	無し	4 Hz 変調
5	有り	無し	4 Hz 変調
6	有り	有り	4 Hz 変調
7	無し	無し	8 Hz 変調
8	有り	無し	8 Hz 変調
9	有り	有り	8 Hz 変調
10	無し	無し	16 Hz 変調
11	有り	無し	16 Hz 変調
12	有り	有り	16 Hz 変調
13	無し	無し	32 Hz 変調
14	有り	無し	32 Hz 変調
15	有り	有り	32 Hz 変調

まず、それぞれの振動条件で約 10 秒間、1 回ずつ振動を提示した。次に本実験を行った。実験中は被験者に閉眼するよう指示した。振動提示は、5 つの振動条件で約 10 秒間、1 回ずつ振動を提示した。この振動提示の後、振動の類似度を 7 段階リッカート尺度で回答させた。この一連の手順を、3 つの装置条件で行った。それぞれの装置条件に対して 5 つの振動条件の提示順序はランダムに決定した。

2.2.5 実験結果

周波数ごとの 3 つの装置条件での回答結果を図 6 に示す。この実験結果に対して、ART-ANOVA 検定を行なった結果、振動の種類においてのみ主効果が見られた。そこで振動の種類に対して ART-C による多重比較を実施した。その結果、200 Hz と 4, 8, 16 Hz 変調、4 Hz 変調と 16, 32 Hz 変調、8 Hz 変調と 32 Hz 変調において有意水準 1% で有意差が見られた。また、200 Hz と 32 Hz 変調、4 Hz と 16 Hz

変調で有意水準 5% で有意差が見られた。

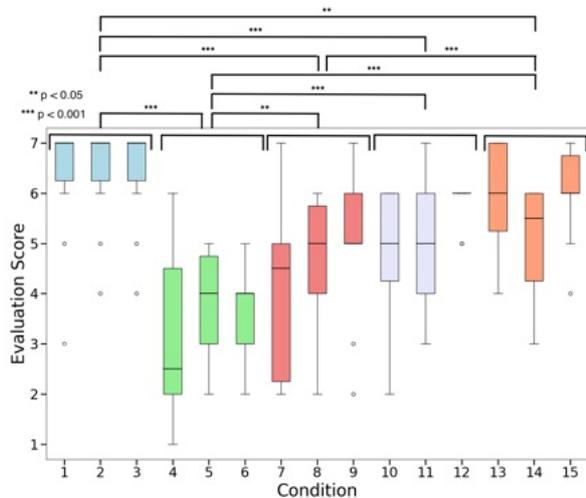


図6. 実験結果. 実験条件の番号は表1を参照

3. 考察

3.1 実験1. 二点弁別閾の検証実験

実験結果のグラフから、LRA の配置間隔が大きくなっていくにつれ、線形的にやや正答率が上がっているのが確認できる。しかしながら、振幅変調振動と単純な正弦波振動、および LRA の配置間隔の違いによる指腹の二点弁別閾に顕著な差異は見られない。この原因としては振動子のサイズから振動子中心間の距離が十分に小さくなく、回答が最初から飽和していたためと考えられる。今回の実験は経時的な二点弁別実験であったが、より難易度の高い同時的な二点弁別実験であれば異なる結果となった可能性はある。

LRA の間隔が 2 mm、4 Hz 変調振動の条件を除く全ての条件において正答率は 90 % 以上であり、間隔 2 mm、4 Hz 変調振動の条件でも約 85 % であった。これは LRA を指先に複数取り付け付けた際に、LRA 同士の間隔が 1 mm 程度であっても、問題ないことを意味する。

LRA の間隔 2 mm、4 Hz 変調振動の条件で正答率がやや低くなった原因は不明であり、今後の検討を要する。

3.2 実験2. 指腹への振幅変調振動の知覚評価実験

実験結果のグラフから、4 Hz 変調振動がやや類似度が低いという結果になった。一方、8 Hz や 16 Hz での変調振動ワッシャ有りの条件、また 32 Hz 変調での振動条件においてやや類似度が高い傾向にある。また被験者から、16 Hz 変調振動で振動が類似している、低周波感が感じられていたなどといったコメントがあった。この原因として、ワッシャと指腹での全体の共振周波数が 16 Hz 前後であった可能性が考えられる。また、ワッシャは特に高周波振動による皮膚変形が局所的になるように設計されたものであるが、これによって低周波感を増強する効果は確認できなかった。

4. おわりに

本稿では、LRA の間隔と振幅変調の有無によって指先の振動に対する二点弁別閾の影響を検証した。実験1では、振幅変調を行った場合、空間解像度の高さは単純正弦波振動と同等であった。

実験2では、低周波感を強固にする機構について検討したが、効果は検証されなかった。一方で 8 Hz 以上の振動に関してはこうした機構が無い場合でも通常の正弦波と同様の触感が得られた。

今後は、指腹と指側面に振動子を多数並べた VR 用グローブを作成するとともに、隣り合った振動子の位相を制御するなどの低周波感や圧覚を知覚させるための手法も試みる。

参考文献

- [1] L. Winfield, J. Glassmire, J. E. Colgate, M. Peshkin, "T-PaD: Tactile Pattern Display through Variable Friction Reduction," *World Haptics Conf.*, 421-426, 2007
- [2] H. Culbertson, J. Unwin, K. J. Kuchenbecker, "Modeling and Rendering Realistic Textures from Unconstrained Tool-Surface Interactions," *IEEE Tran. Haptics*, 7(3), 381-393, 2014
- [3] B. L. Kodak, Y. Vardar, "FeelPen: A Haptic Stylus Displaying Multimodal Texture Feels on Touchscreens," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, 28(5) 2930-2940, 2023
- [4] Konyo, M., Tadokoro, S., Yoshida, A., Saiwaki, N., "A tactile synthesis method using multiple frequency vibrations for representing virtual touch," *IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots & Systems*, 3965-3971, 2005.
- [5] S. -C. Kim et al., "Small and lightweight tactile display (SaLT) and its application," *World Haptics*, 69-74, 2009
- [6] Y. Ujitoko, T. Taniguchi, S. Sakurai, K. Hirota, "Development of Finger-Mounted High-Density Pin-Array Haptic Display," *IEEEAccess*, 145107-145114, 2020
- [7] V. Shen, T. Rae-Grant, J. Mullenbach, C. Harrison, C. Shultz, "Fluid Reality: High-Resolution, Untethered Haptic Gloves using Electroosmotic Pump Arrays," *Proc. UIST*, Article 8, pp. 1-20, 2023
- [8] M. J. Hsieh, R. H. Liang, B. Y. Chen, "NailTactors: Eyes-Free Spatial Output Using a Nail-Mounted Tactor Array," *Conf. MobileHCI '16*, New York, NY, USA, 29-34, 2016.
- [9] G. Park, S. Choi, "Perceptual space of amplitude-modulated vibrotactile stimuli," *World Haptics Conf*, 59-64, 2011
- [10] U. A. Alma, R. Rosenkranz, M. E. Altinsoy, "Perceptual Substitution Based Haptic Texture Rendering for Narrow-Band Reproduction," *IEEE Trans. Haptics*, 16(2) 204-214, 2023
- [11] N. Asamura, N. Tomori and H. Shinoda, "A tactile feeling display based on selective stimulation to skin receptors," *VR/IS '98*, Atlanta, GA, USA, pp. 36-42, 1998