



非接触触覚提示による離散点刺激と連続刺激の類似度比較

Tactile perception similarity between discrete points stimulation and continuous stimulation
by non-contact tactile display

森崎汰雄¹⁾, 藤原正浩¹⁾, 牧野泰才¹⁾, 篠田裕之¹⁾

Tao MORISAKI, Masahiro FUJIWARA, Yasutoshi MAKINO, and Hiroyuki SHINODA

1) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒277-8561 千葉県 柏市 柏の葉 5-1-5, morisaki@hapis.k.u-tokyo.ac.jp)

概要: 仮現運動やファントムセンセーションとして知られる離散点刺激は、その刺激点の間を移動する運動感覚を生起できる。この錯覚は、例えば疎に配置した振動子のみで動きのある触覚提示を可能にする。一方で、この錯覚で得られる刺激はその連続性のみ評価されており、再現したい連続刺激に類似した触感を有するかは明らかでない。本研究では、超音波による接触刺激を用いて、離散点刺激と連続刺激の類似性について調査した。実験結果より、いくつかの刺激間隔では知覚的に等価であることが分かった。今後は提示刺激の強さを改善し、知覚的に等価な触感が得られる条件について調査する。

キーワード: 仮現運動、ファントムセンセーション、運動感の生起、非接触触覚提示

1. 緒言

触覚提示を行う際、離れた点を時間的に連続して刺激すると、その刺激点の間を刺激が連続運動する感覚が生起される。この現象は仮現運動[1]やファントムセンセーション[2]と呼ばれ、少ない振動子で人になでられた感覚といったような連続的な刺激を再現することが出来るため、多くの研究や触覚デバイスに利用されている[4][5]。

離散点刺激がよりよく移動感覚を生起できる条件についても研究されている。Kirman は刺激期間や the inter-stimulus onset (ISOI)、刺激子の数が仮現運動の生起にあたる影響について調査した[6][7]。この刺激は銅製のピンを用いた振動刺激で被検者の指に対して与えられた。Kirman は他にも、15×15のプラスチックピンマトリックスを用いて、刺激の形状が移動感覚に与える影響について調査している[8]。Wilson[3]らは超音波による刺激を用いて、手のひら上で仮現運動がよりよく生起する条件について調査した。

一方で、離散点刺激によって生み出される移動感覚が実際に(物理的に)連続移動する刺激と見分けがつくか、すなわち知覚的に等価なものであるかについてはこれまで評価されてこなかった。このため、離散点刺激は物理的な連続刺激を再現しているのか、単に移動感覚を生起している物であるのかは明らかにされていない。Iwamoto と Shinoda[9]は連続刺激と離散点刺激の見分けがつくか実験を行ったが、この時用いた刺激は水中超音波をゴム膜を張

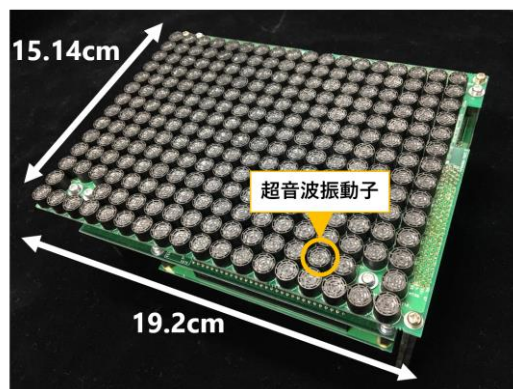


図 1: 空中超音波フェーズドアレイ

った指先に照射することで生成したものであり、露出した肌においては検証できていない。

本研究では、離散点刺激と物理的に連続な移動刺激を露出した手のひら上で比較し、これらの刺激が知覚的に等価であるかを明らかにする。実験には超音波による非接触な触覚提示を用いた。超音波刺激には摩擦がないため、提示刺激の圧力分布以外の影響を無視して離散点刺激と連続刺激を比較することができる。

本研究で連続刺激と離散点刺激が知覚的に等価となる条件が明らかになれば、刺激子の配置間隔など、ウェアラブル触覚デバイスの明確な設計指針が与えられる。

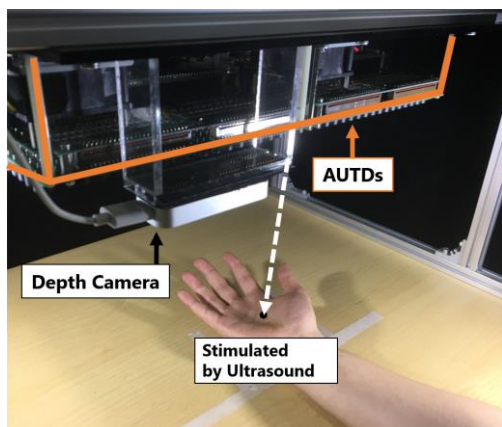


図 2: 実験の写真

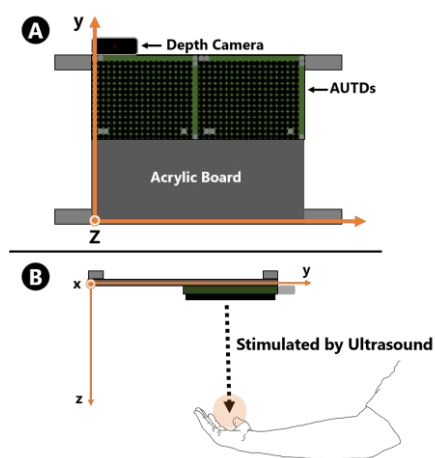


図 3: A) 装置のセットアップ。本装置は 2 台の超音波フェーズドアレイとデプスカメラから構成される。B) フェーズドアレイとデプスカメラは下を向き、被験者は自分の手のひらを振動子面に向けた。

2. 空中超音波フェーズドアレイ

本研究では、摩擦のない非接触な刺激を提示するのに超音波フェーズドアレイを使用した[10][11][13]。超音波フェーズドアレイは独立制御可能な超音波振動子をアレイ状に並べたものであり、空間解像度約 1 cm^2 で空中に圧力の高い刺激点を生成できる。図 1 に、実際に使用した超音波フェーズドアレイを示す。

超音波による提示圧力 P は次式で求められる。

$$P = \alpha E = \alpha \frac{p^2}{\rho c^2} \quad (1)$$

ここで p は超音波の音圧、 ρ は空気の密度、 c は音速である。また、 α は反射係数であり超音波の対象によって決定される。

3. 実験

本実験では、離散点刺激と物理的に連続な移動刺激の類似度を比較する。同時に、生起された移動感覚の連続性についても評価し、連続性と類似性の変化を比較する。

3.1 実験装置

本実験において離散点に与えられた各刺激は、それぞれ超音波フェーズドアレイを 1 台ずつ使用して生成され

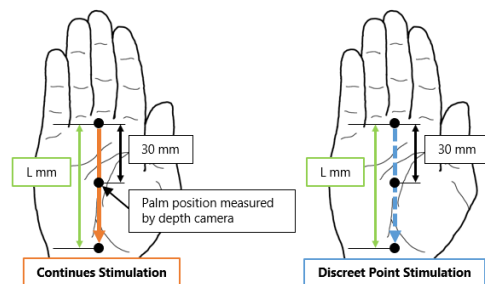


図 4: 提示刺激の軌道

た。離散点刺激で運動感を生起するには、隣り合った二点を同時に刺激する必要がある。したがって、超音波フェーズドアレイは合計で 2 台使用した[12]。また、連続刺激は単に 1 台のフェーズドアレイのみを用いて行った。実験の写真を図 2 に、装置のセットアップを図 3 に示す。

3.2 連続刺激のデザイン

本実験で用いた連続刺激は、直径 1 cm^2 の超音波刺激点を移動速度 v で走査して生成した。刺激場所は被験者の手のひら上であり、手のひら中心より 30 mm 上から手を縦断するように刺激点を走査した。手の中心はデプスカメラ (Leap Motion) を用いて取得した。刺激の軌道を図 4 に示す。

連続刺激が与える力 f は以下の式で表現される。

$$f(t) = A \varphi(t) \quad (2)$$

ここで A は提示力の最大値を表す定数である。 $\varphi(t)$ は最大値が 1 のテンプレート信号であり、提示圧力の変調に用いる。例えば、 $\varphi(t)$ を大きさ 1 の定数係数にすれば提示刺激は大きさ A の静圧となる。また、 $\varphi(t)$ を 200 Hz の正弦波とすれば、提示刺激は最大値が A の 200 Hz 振動刺激となる。本実験の連続刺激においては、 A は超音波フェーズドアレイの最大出力 1.6 mN であり、 $\varphi(t)$ は 200 Hz 正弦波、 50 Hz 正弦波、ホワイトノイズを使用した。

3.3 離散点刺激のデザイン

本実験では、離散刺激の条件を提示エネルギーの総和が再現したい連続刺激と同じであることとした。この条件が最もよい離散刺激の条件であるかは自明ではないが、本実験ではこの条件を満たす刺激にのみ注目した。

離散点刺激を与える刺激位置を K_i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) とする。この時、超音波フェーズドアレイによって各点 K_i に与えられる力 f_i は次式で与えられる。

$$f_i(t) = A_i(t) \varphi(t) \quad (3)$$

ここで、 $A_i(t)$ は提示力の最大値を変化させる関数であり、本実験では線形関数のみを用いている。この線形関数の傾きは、生起したい移動感覚の速度 v と、離散刺激点の間隔 d によって決定される。

例として、 2 cm 離れた 2 点 K_1, K_2 の間に刺激速度 10 cm/s の移動感覚を生起する場合を考える。移動感覚の方向は K_1 から K_2 に向かう向きとする。この時、 A_1 及び A_2 の傾きは $2 \div 10 = 0.2$ となる。この時の A_1 と A_2 のグラフを図 6 に示す。

3.4 実験方法

被験者は 8 名の男性であった (23~27 歳)。被験者はヘッ

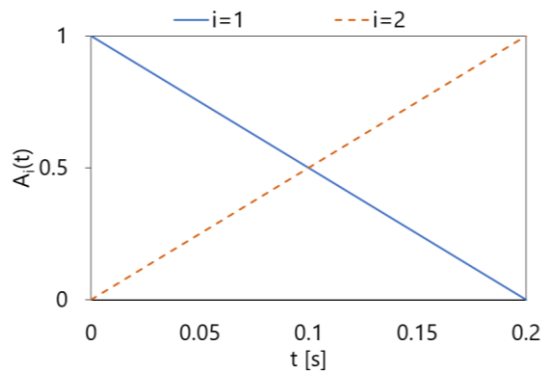


図 6: 2 cm 離れた 2 点間に刺激速度 10 cm/s の移動感覚生起を目的とした場合の $A_i(t)$ の変化。

ドフォンでホワイトノイズを聴いており、外部の音が聞こえない状態で実験を行った。また、被験者には提示刺激が連続刺激と離散点刺激のどちらであるかは知らせずすべての実験を行った。

被験者はまず、図 2、図 3 のように手を実験装置の下におき、基準刺激として連続刺激を与えられる。その後、比較刺激（連続刺激か離散点刺激）を与えられ以下の質問に Yes / No で回答する。

Q1. 比較刺激と基準刺激は同じ刺激であったか。

Q2. 比較刺激は連続に感じられたか。

刺激速度 v は 16 cm/s, 13.3 cm/s, 11.4 cm/s, 10 cm/s の四種類であり、刺激間隔 d は 0 mm (連続刺激), 20 mm, 30 mm, 40 mm, 60 mm, 80 mm の 6 種類であった。この組み合わせはランダムな順番で提示された（ただし、比較刺激と連続刺激は同じ速度であった）。刺激の長さ L は d が 20 mm, 40 mm, 80 mm の時 80 mm であり、 d が 30 mm, 60 mm の時 60 mm とした。

テンプレート信号 $\varphi(t)$ は 200 Hz 正弦波、50 Hz 正弦波、ホワイトノイズを使用した。本実験ではまずランダムな順番でテンプレート信号を選択し、選択したテンプレート信号一定の下で刺激速度と刺激間隔を変化させた。刺激速度と刺激間隔について全ての組み合わせ実行されると、別のテンプレート信号を選択する。したがって、本実験の試行回数は一人当たり $(4 \times 6) \times 3 = 72$ 回であった。

4. 実験結果

実験結果を図 5 に示す。ここで、各グラフの縦軸は質問に Yes と答えた被験者の数である。ただし、総被験者数で除しており *positive answer ratio R* とした。一人の被験者は 50 Hz で変調された提示刺激を完全に知覚することができなかった。この結果はグラフから除外している。

5. 議論

図 5 の結果より、離散点刺激と連続刺激はいくつかの刺激間隔においては知覚的に等価であり、見分けることができなると考えられる。正弦波 200 Hz の結果においては、離散点刺激と連続刺激の類似性は移動感覚の連続性より

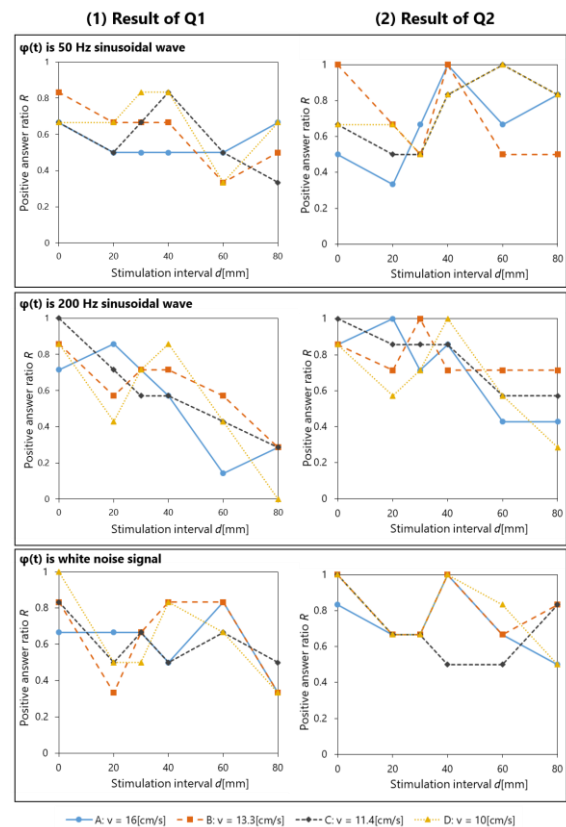


図 5: 実験結果。縦軸は各グラフの縦軸は質問に Yes と答えた被験者の数である。ただし、総被験者数で除しており *positive answer ratio R* とした。テンプレート信号 $\varphi(t)$ は 50 Hz 正弦波、200 Hz 正弦波、ホワイトノイズであった。

も早く減少する傾向がみられた。例えば刺激間隔が 40 mm のとき、 $v=16$ cm/s と、 $v=11.4$ cm/s において類似性 (Q1) の R は 0.6 を下回っているが、連続性 (Q2) の R は下回っていない。また、類似性の R が 1 (最大値) となったのは $v=11.4$ cm/s かつ $d=0$ mm の時のみであったが、連続性の R が 1 となったのは合計で 4 回あった。

一方で、図 5 に示した結果のうち $\varphi(t)$ が正弦波 50 Hz とホワイトノイズであったものについては R の変化に明確な傾向がみられなかった。明確な傾向が得られなかった原因として、正弦波 50 Hz とホワイトノイズで変調した刺激が知覚し辛かったことが考えられる。実際に被験者に確認したところ、何人かの被験者は 200 Hz 刺激ははっきり知覚できたのに対し、その他の刺激は知覚し辛かったとコメントした。この解決策として、より多くの超音波フェーズドアレイを用いて十分に知覚可能な刺激を提示することが考えられる [12]。200 Hz 以外についても実験データを集めることができれば、類似性と連続性を厳密に比較することができ、例えばそれぞれが生起される条件や、刺激間隔の閾値を明らかにすることができる。

6. 結言

本研究では、超音波による非接触かつ無摩擦な触覚刺激

を用いて離散点刺激と物理的に連続な移動刺激の知覚における類似度を比較した。使用した触覚刺激は 200 Hz, 50 Hz の正弦波及びホワイトノイズによって変調された振動刺激であった。

正弦波 200 Hz の結果より、離散点刺激と連続刺激はいくつかの刺激間隔においては知覚的に等価であり、見分けることができないことが明らかになった。また、その類似性は感じられた移動感覚の連続性よりも早く減少する傾向がみられた。

これからの研究として、より多くの超音波フェーズドアレイで十分知覚可能な刺激を提示し、他の振動刺激について再実験を行うことが考えられる。再実験により厳密な類似性と連続性の比較が可能になり、それぞれが生起される条件や、刺激間隔の閾値を明らかにすることができると思われる。

参考文献

- [1] C. E. Sherrick and R. Rogers, "Apparent haptic movement," *Percept. Psychophys.*, vol. 1, no. 6, pp. 175–180, 1966.
- [2] G. von Békésy, "Neural Funneling Along the Skin and Between the Inner and Outer Hair Cells of the Cochlea," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 31, no. 9, pp. 1236–1249, 1959.
- [3] G. Wilson, T. Carter, S. Subramanian, and S. A. Brewster, "Perception of ultrasonic haptic feedback on the hand," *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '14)*, pp. 1133–1142, 2014.
- [4] A. Israr and I. Poupyrev, "Tactile Brush: Drawing on Skin with a Tactile Grid Display," *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '11)*, pp. 2019 - 2028, 2011.
- [5] G. Huisman, A. Darriba Frederiks, B. Van Dijk, D. Hevlen, and B. Krose, "The TaSSt: Tactile sleeve for social touch," *Proceedings of 2013 World Haptics Conference (WHC 2013)*, pp. 211–216, 2013.
- [6] J. H. Kirman, "Tactile apparent movement: The effects of interstimulus onset interval and stimulus duration," *Percept. Psychophys.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–6, 1974.
- [7] J. H. Kirman, "Tactile apparent movement: The effects of number of stimulators," *J. Exp. Psychol.*, vol. 103, no. 6, pp. 1175–1180, 1974.
- [8] J. H. Kirman, "Tactile apparent movement: The effects of shape and type of motion," *Perception & Psychophysics*, vol. 34, no. 1, pp. 96–102, 1983.
- [9] T. Iwamoto and H. Shinoda, "Ultrasound tactile display for stress field reproduction - Examination of non-vibratory tactile apparent movement," *Proceedings of 2013 World Haptics Conference (WHC 2005)*, pp. 220–228, 2005.
- [10] T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda, "Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound," *IEEE Transunion on Haptics (TOH)*, vol. 3, no. 3, pp. 155–165, 2010.
- [11] T. Carter, S. A. Seah, B. Long, B. Drinkwater, and S. Subramanian, "UltraHaptics: Multi-Point Mid-Air Haptic Feedback for Touch Surfaces," *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST'13)*, pp. 505–514, 2013.
- [12] S. Inoue, Y. Makino, and H. Shinoda: "Scalable Architecture for Airborne Ultrasound Tactile Display", *AsiaHaptics 2016: Haptic Interaction*, Kashiwanoha, pp.99-103, Nov. 29–Dec. 1, 2016.
- [13] K. Hasegawa, H. Shinoda, "Aerial Vibrotactile Display Based on Multiunit Ultrasound Phased Array," *IEEE Transactions on Haptics (TOH)*, vol. 11, no. 3, pp. 367-377, 1 July–Sept. 2018.