



# 外界を表現する立体振動ディスプレイ

## 第 7 報：ファントムセンセーションを生起する刺激条件の検討

大原 玄<sup>1)</sup>, 昆陽 雅司<sup>1)</sup>, 田所 諭<sup>1)</sup>

1) 東北大学 情報科学研究科 (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01, konyo@rm.is.tohoku.ac.jp)

**概要:** 立体振動は外界に振動源を定位させることで物体の存在感を表現する振動触覚技術である。筆者らは高周波振動の知覚インテンシティを複数の振動子に配分することで、任意波形の振動像を定位させることに成功してきた。しかし、複数の振動子が統合されず、振動像を知覚しにくい場合があった。本稿では 2 点の振動子間に生じるファントムセンセーション (PhS) に着目し、包絡成分の周波数が異なる振幅変調波刺激に対して、PhS の生起率を比較する実験を行った。その結果、刺激の時間的ずれを区別しにくくなる低周波で変動する振幅変調波で、PhS が生起されやすい傾向が確認された。

**キーワード:** 触覚, 振動源定位, ファントムセンセーション

### 1. 緒論

振動源定位技術により外界のオブジェクトを表現することは、オブジェクトの实在感を高めバーチャルリアリティの臨場感を高める効果が期待できる。本研究では 3 次元的な振動源定位を可能にし、また任意のオブジェクトを信号波形で表現する立体振動の実現を目標とする。

従来の振動源定位技術として、ファントムセンセーション (PhS) を応用したものが挙げられる。PhS は駆動する複数の振動子の間に仮想的な振動源を知覚する現象である。Israr らは PhS と刺激の位相差を利用して、座面上を移動する仮想振動源を表現できることを確認している [1]。

筆者らの研究グループは、体外の任意波形の振動源について立体的な定位感を伝える立体振動ディスプレイの開発を行ってきた。高周波振動の感覚等価変換技術 Intensity Segment Modulation (ISM) を用いて振動の知覚量を複数の振動子に配分することで振動を定位させる。稲垣らは床面振動デバイスを用いた足裏への刺激により床面上の振動源を定位できることを定量的に確認した [2]。菊池らは腕輪型デバイスを用いた前腕への刺激により振動物体を腕から放出する感覚を表現できることを確認し [3]。またそれらのディスプレイについて振動源の定位性能や立体的な表現を定量的に評価してきた。この成果は今後発表する予定である。しかし、立体振動の刺激条件によっては統合された振動像が生起されにくい場面が何度か確認された。

立体振動の振動像をより確実に提示するためには、振動波形の刺激条件と振動像の生起の関係について理解を深めることが必要である。そこで、本研究では、2 点の振動子間に生じるファントムセンセーションの生起条件に着目する。従来研究では、PhS 生起と刺激条件の関係について、インパルス信号の周波数が PhS 生起に影響を与えることが報告されている [4]。一方、本研究が提案する ISM を利用した提示法では、連続的に変動する振動も定位させることが可



図 1: 立体振動のイメージ図

能であるが、連続的な振動波形については、PhS を生起する要因や条件は報告されていない。

本稿では、腕部に装着した複数の振動デバイスを包絡線周波数の異なる振幅変調波で駆動し、包絡線の周波数及び振動子間の距離が PhS 生起に及ぼす影響を調査する。

### 2. 振動提示法と波形条件の設定

#### 2.1 Intensity Segment Modulation

本研究では様々な振動を提示するにあたり、Intensity Segment Modulation (ISM) [5] を利用している。ISM は入力した信号の触感を維持しながら高周波成分の情報を任意の低キャリア周波数の波形に変換する手法で、ヒトの振動知覚における周波数依存特性と包絡線検出特性を考慮している。波形変換の過程で算出する知覚インテンシティ [6] (式 1) を振動強度として複数の振動子に配分することで、振動源の定位位置を制御する。この方法は、従来の 2 点の振動子間に発生する PhS にも利用できることを報告している [7]。

$$I(f) = \left[ \left( \frac{A}{A_T(f)} \right)^2 \right]^{a(f)} \quad (1)$$

#### 2.2 PhS に生起性に関わる振動刺激条件の設定

PhS は、実際に配置された 2 つの振動子の存在を感じずに、その間に振動源があるように感じる錯覚であり、2 つの

振動子の体感は統合されて1つの振動子の体感のように感じられる必要がある。このような体感の統合では、複数に提示された刺激の同期性の把握が振動像の統合のされやすさと関係する可能性がある。例えば、加藤らは、インパルス刺激の周波数が高くなるとPhSを知覚しづらくなることを報告している[4]。具体的には、1,2 Hzの低周波帯でははっきり知覚し、5 Hzで鈍化しはじめ、50 Hzなどの高周波帯で鈍い知覚になる。これは、低周波帯の信号ではインパルス信号のピークひとつひとつを知覚して刺激の時間的な同期性を把握しやすくなることがPhSが生じやすくなる要因の一つとして考えられる。

一方、振動刺激の時間的ずれを把握しにくくさせることで、振動像の統合が起こりやすくなる可能性もある。黒木らは、2本の指先に提示された振動の時間的ずれを知覚する手がかりについて議論しており、高周波の振動でも、振幅変調波のように振幅が変動する場合は、時間差を知覚することが比較的容易であることを報告している[8]。また、黒木らは実験の中で、振幅変調波の変動周期の周波数が小さくなるほど時間的なずれを検出しにくくなることを報告している。

本稿では様々な周波数の包絡線をもつ振幅変調波を振動提示に利用し、包絡線の周波数ごとにPhSが生起されるか検証する。また、振動子間の距離の影響についても同時に検証する。

### 3. 実験:前腕部のファントムセンセーション生起実験

ファントムセンセーションを生起する刺激の条件を調査するために、前腕部に設置した複数の振動子について駆動に用いる信号や、振動子の組み合わせによる振動子間の距離の条件を変えながら、知覚した振動源の数を回答する実験を行った。

#### 3.1 実験装置

実験で利用したデバイスについて説明する。実験では図2のように4つの腕輪型振動デバイスを用いた。腕輪にはオーディオエキサイタ (Tectonic Audio Labs, TEAX13C02-8/RH) をそれぞれ1つ取り付け、刺激を提示する振動子として用いた。腕輪型デバイスは5 cm 間隔で取り付けた。

振動を提示するシステムについて説明する。振動を提示する際には、Unity上で生成される音声信号から振幅変調波を生成し、USBオーディオインターフェース (MOTU, Ultralite AVB) でアナログ信号に変更し、アンプ (Syntacts Amplifiers v3.1) による増幅を経て振動子を駆動する。

#### 3.2 手法

以下の手順でファントムセンセーション生起実験を行った。

1. 被験者に図2のようにデバイスを装着し、デバイスの刺激を等しく知覚するように調整する。
2. ランダムな振動子間距離条件、波形条件でデバイスを駆動し、振動を感じた数を1,2で回答する。
3. 手順3を1試行として240試行繰り返す。このとき振動子間距離条件と波形条件について、条件ひとつひ

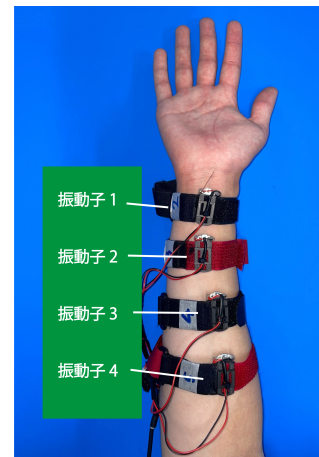


図2: 被験者の前腕部に装着した腕輪型デバイス

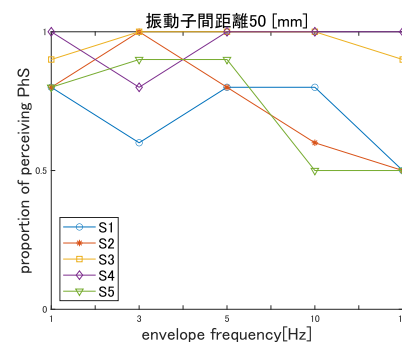


図3: 振動子間距離 50 mm の場合の PhS 知覚率

とつ々の試行回数が均等になるように繰り返す。

実験条件について説明する。波形条件は、振幅変調する包絡線の周波数が異なる8条件を設定した。使用した信号は周期的な矩形波とキャリア周波数800 Hzの振幅変調波である。矩形波は周期5,10,15 Hzの3条件で、振幅変調波は包絡線の周波数が1,3,5,10,15 Hzとなる5条件である。これらの8つの信号に対して200 Hzをキャリア周波数とするISMによる変換を適用した信号を振動提示に用いた。振動子間距離条件は、駆動する振動子の組み合わせを変更することで3条件設定した。図2の振動子1と振動子2を選択した場合の5 cm、振動子1と振動子3を選択した場合10 cm、振動子1と振動子4を選択した場合15 cmの3条件である。

被験者は実験中、イヤーマフとピンクノイズで聴覚を遮断した。また被験者は20~50代の男女6人である。

### 4. 実験結果

被験者ごとに、提示した信号とPhSを知覚した割合の被験者毎の結果を図3, 4, 5に示す。全体をみると、距離条件によらず全員が70%程度の割合でPhSを知覚していることがわかる。被験者ごとの結果に注目すると、5~15 Hzの区間において、包絡線の周波数が高くなるほどPhSを知覚した割合が下がる傾向が確認できる。

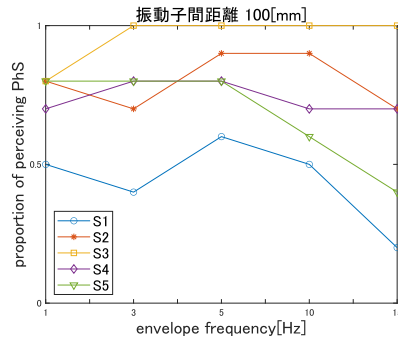


図 4: 振動子間距離 100 mm の場合の PhS 知覚率

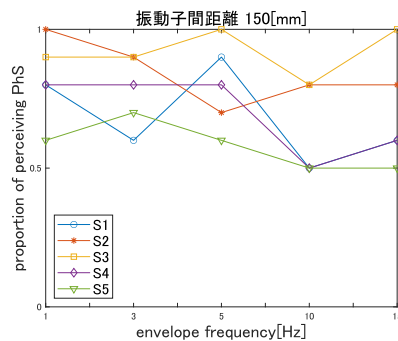


図 5: 振動子間距離 150 mm の場合の PhS 知覚率

## 5. 考察

包絡線の周波数と PhS の生起率の関係について考察する。包絡線 5~15 Hz の区間において多くの被験者が、包絡線の周波数が高くなるほど PhS を知覚しづらいという結果を示していた。また 1~5 Hz の区間において被験者の回答の傾向は大きく変わらなかった。

包絡線が低周波になるほど PhS が生起しやすくなる要因について、2.2 節で述べたように、2 つの解釈が可能である。1 つ目は、変動の周期が遅くなることによって、刺激の同期性を確認しやすくなったという解釈である。事前の調査から、5 Hz 以下では包絡線による振幅の変動をはっきりと知覚し、10 Hz 程度ではぼんやりと振幅の変動を知覚し、15 Hz 以上ではひとつひとつの振幅の変動をほとんど知覚できなかったことがわかった。したがって包絡線による振幅の変動を知覚しやすいほど PhS を知覚しやすい可能性がある。2 つ目は、振幅変調波の包絡線の周波数が低くなるほど、刺激間の時間的ずれを区別しづらくなったという解釈である。提示刺激は刺激が周期的に変動する刺激であるが、PhS 提示のために振動子毎に強度差を付けた場合、時間的にずれた刺激と解釈される可能性があり、この場合、振動像の統合が阻害される可能性がある。黒木ら [8] によって報告されているとおり、低周波で変動する振幅変調波は時間的同期性を区別しにくくなることが報告されており、これが違和感なく PhS を生起させた可能性がある。

刺激位置の間隔と PhS の間隔について考察する。一般に、刺激位置どうしの距離が大きくなるほど PhS を知覚しづら

くなることが知られている。本実験でも駆動する振動子間距離を変化させて PhS を知覚するか検証したが、どの距離条件においても 70% 程度の割合で PhS を知覚しており、距離による傾向も違いは明確には見られなかった。

## 6. 結論

本稿では、PhS の生起と刺激条件の関係を検証するために、前腕部に装着した複数の振動デバイスを様々な振幅変調波で駆動しながら知覚した振動源の数を回答する実験を行った。その結果、振幅変調波の変動の周波数が小さくなるほど PhS を生起しやすい傾向が見られた。今後は本実験で得られた知見を立体振動に応用し、立体振動を誘発しやすい振動提示方法を検討していく。

## 7. 謝辞

本研究は JSPS 科研費 21H05795 の助成を受けた。

## 参考文献

- [1] Israr, A. and Poupyrev, I.: *Tactile Brush: Drawing on Skin with a Tactile Grid Display*, p. 2019–2028, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA (2011).
- [2] 稲垣匠馬, 昆陽雅司, 田所諭: 外界を表現する立体振動ディスプレイ, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 (2022).
- [3] 工藤響, 菊池大輝, 星裕也, 昆陽雅司, 田所諭: 立体的な振動ファントムセンセーションを利用した放出間の表現, 第 22 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集 (2021).
- [4] Kato, H., Hashimoto, Y. and Kajimoto, H.: Basic Properties of Phantom Sensation for Practical Haptic Applications, in Kappers, A. M. L., Erp, van J. B. F., Bergmann Tiest, W. M. and Helm, van der F. C. T. eds., *Haptics: Generating and Perceiving Tangible Sensations*, pp. 271–278, Berlin, Heidelberg (2010), Springer Berlin Heidelberg.
- [5] Yamaguchi, K., Konyo, M. and Tadokoro, S.: Sensory Equivalence Conversion of High-Frequency Vibrotactile Signals using Intensity Segment Modulation Method for Enhancing Audiovisual Experience, *IEEE Transactions on Haptics* (2021).
- [6] Bensmaïa S, Y. J., Hollins M: *Vibrotactile intensity and frequency information in the pacinian system: a psychophysical model*.
- [7] 菊池大輝, 昆陽雅司, 田所諭: 振動インテンシティを用いた任意波形のファントムセンセーションの生成 第 2 報: 位置制御性と触感維持性の評価, 第 26 回日本バーチャルリアリティ学会大会 (2021).
- [8] Kuroki, S. and Watanabe, J.: *Neural Timing Signal for Precise Tactile Timing Judgments*, Vol. 2016, pp. 1620–1629 (2016).