



# 外界を表現する立体振動ディスプレイ

## 第 10 報：胴体装着型立体振動デバイスの定位精度評価

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配分して複数振動子のデバイスを駆動することで、床面上や前腕周辺の空間で仮想振動源を定位させることに成功してきた。しかし振動提示位置などの制約から、上半身周辺の任意の位置に定位させることはできていなかった。そこで本研究では身体周辺の空間を定位させるために胴体装着型デバイスを開発し、全方位で定位精度を測定する実験を行った。その結果、全方位である程度の精度で定位できること、特に水平方向では高い精度が実現できることがわかった。

**キーワード:** 触覚, ウェアラブルデバイス, 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、オブジェクトの存在感を高め仮想現実や複合現実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の触感を振動触覚で表現する「立体振動」技術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では、任意波形の振動を提示する体外の振動源を表現する立体振動を考案し [2][3], ディスプレイの開発や評価を行ってきた。立体振動では高周波振動の感覚等価変換技術である Intensity Segment Modulation (ISM) [4] を用いて振動触覚の知覚量を算出し、体表の複数振動子に振動強度として配分して駆動することで仮想振動源を定位させる。稲垣らは、床面の振動デバイスを用いた足裏への刺激により平面上に仮想振動源を表現し、仮想振動源の運動を識別させることで定位性を評価した [5]。筆者らは腕輪型の振動デバイスを用いて前腕周辺の空間を運動する仮想振動源を表現し、その定位性能を定量的に評価してきた [3]。しかしこれらのデバイスを使ったシステムは、振動提示位置が前腕や床面上に限られており、上半身も含む身体全周 360 度で立体的な定位感を表現することはできなかった。

本稿では、身体周辺のあらゆる位置で定位を可能にするために図 1 のような胴体装着型の立体振動デバイスを開発し、その定位性能を測定した結果を報告する。



図 1: 立体振動のイメージ図

### 2. 胴体装着型デバイスを用いた立体振動

#### 2.1 立体振動の概要

立体振動の基本原則を説明する [5][3]。立体振動では、ヒトの振動触覚の知覚特性に応じて振動源の知覚量を算出し、仮想振動源の位置を表現するように複数の振動子に知覚量を分配することで定位させる。以下では振動触覚の知覚量と、振動強度の分配方法について簡単に説明する。

本研究では、振動触覚の知覚量の指標として知覚インテンシティ [6] を利用した。知覚インテンシティを利用したのは、この指標がヒトのパチニ小体が高周波振動知覚の周波数依存性を考慮した振動強度だからである。また本研究では、知覚インテンシティを算出する際に Intensity Segment Modulation (ISM) [4] を利用した。ISM は知覚インテンシティの低周波の変動検出特性を考慮しながら 100 Hz 以上の高周波振動の触感を維持したまま任意キャリア周波数の波形に変換する技術であり、波形変換の過程で入力波形の知覚インテンシティが算出される。立体振動では、この知覚インテンシティを知覚強度として各振動子に分配し、分配した強度に基づいて振動子を駆動することで位置を表現する手法を提案している。図 2 に、想定する振動子と仮想振動源の位置関係を示す。立体振動は、仮想振動源の距離

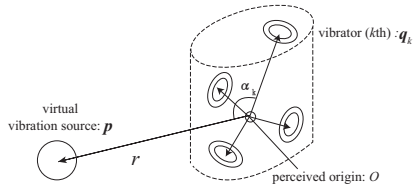


図 2: 立体振動のコンセプト

と方向を表現するように知覚強度を分配することで提示される。距離感を表現するために、仮想振動源  $p$  と知覚原点  $O$  の距離  $r$  に応じた減衰を振動源信号に適用する。振動源が知覚インテンシティ  $I_0$  の振動を発生するとき、距離減衰関数  $d(r)$  を用いて、知覚原点位置で知覚される知覚インテンシティ  $I$  は式 (1) により求められる。ここで、知覚原点  $O$  は身体上に装着された  $N$  個の振動子を等インテンシティで駆動したときに Phantom Sensation[1] によって得られる振動像の中心位置として定義する。

$$I = d(r) \cdot I_0 \quad (1)$$

方位感を表現するために、知覚原点で知覚される強度  $I$  を振動子と振動源の位置関係をもとに分配する。  $k$  番目の振動子に対する知覚強度の分配率  $r_k$  は式 (2) のように決定される。ここで、距離感を保つために分配率  $r_k$  の総和は 1 に保たれる。

$$I_k = r_k \cdot I \quad (2)$$

$r_k$  は知覚原点  $O$  を中心とした振動源ベクトル  $p$  と振動子ベクトル  $q_k$  の内積  $u_k$  (式 (3)) から決定する。これにより、例えば知覚原点を基準に振動源と振動子の方向が一致する場合に最も強く、正反対の方向で最も弱くなることを表現する。

$$u_k = \bar{q}_k \cdot \bar{p} = \frac{q_k \cdot p}{\|q_k\| \|p\|} \quad (3)$$

## 2.2 胴体装着型立体振動デバイス

本研究ではヒトの身体周辺に定位感を表現する胴体装着型デバイス (図 3) を用いた立体振動システムを構築した。

本デバイスは、前面と背面にそれぞれ 4 つ、合計 8 つの振動モジュールを埋め込んだジャケットの形をとる。このとき、図 3 のように身体の中心が知覚原点となるように振動子を配置した。ベルトの締め付け力を調整することで、振動モジュールが身体に押しつけられる力を均一にすることが可能である。モジュールは振動子 (ACTUATOR639897, フォスター電機) を治具で挟むように固定する構造をとる。アクチュエータを駆動することで、ジャケットの表地で身体に押し当てられたモジュールが振動する。

## 3. 実験: 定位性能測定実験

胴体装着型デバイスを使った立体振動について定位の精度を評価するために、図 5 のような知覚原点を中心とする球面上に存在する仮想振動源を定位する実験を行った。



図 3: 胴体装着型の振動デバイス

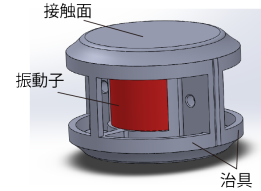


図 4: 振動モジュール

### 3.1 実験装置

刺激の提示に使用した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、前節の振動デバイスを駆動した。

また被検者は実験中ヘッドマウントディスプレイ (VIVE Pro 2) を装着し、付属のコントローラーを使用して位置の回答を行った。

### 3.2 手法

以下の手順で定位性能測定実験を行った。

1. 被験者に図 3 のようにデバイスを装着し、すべての振動子の刺激を等しく知覚するように調整する。
2. 被験者に図 5 を示しながら、知覚原点を中心とした球上に振動源が存在するという実験のシチュエーションについて説明する。
3. 被験者に仮想振動源の位置を操作させながら振動を体感させ、位置の体感に違和感がなくなるまで立体振動の訓練を行う。
4. 図 5 の球面のランダムな位置に仮想振動源を表現し

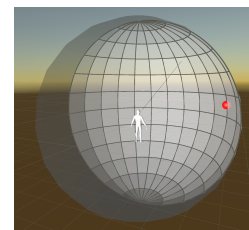


図 5: 実験シチュエーション: 半径 5m の球上に存在する仮想振動源 (赤球) が表現される

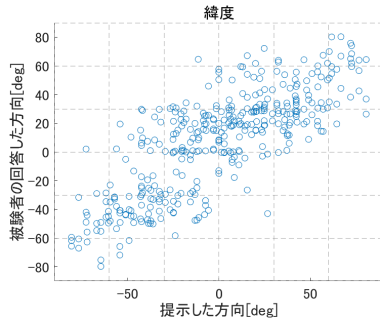


図 6: 鉛直方向の定位結果

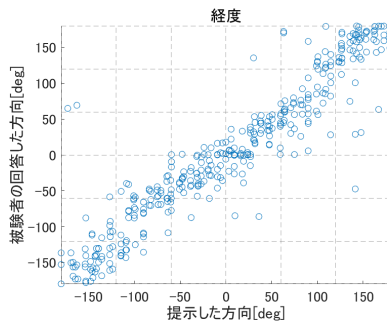


図 7: 水平方向の定位結果

た刺激を 1 度提示する。被験者は知覚した位置をポインタで指し回答を記録する。

- 手順 4 を 120 回繰り返す。ただし 60 試行後に 5 分程度の休憩をとる。

詳細な実験条件について説明する。

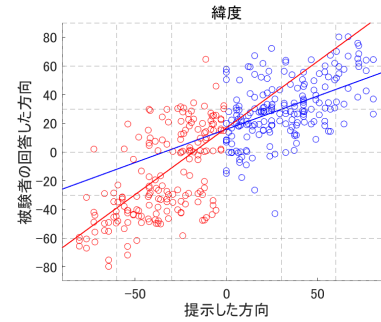
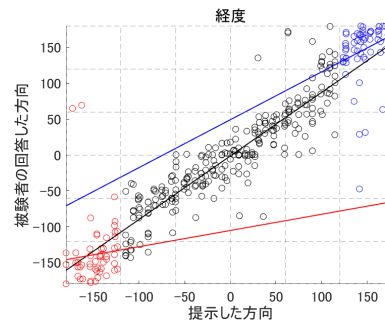
振動刺激に用いた信号は、キャリア周波数 200 Hz で持続時間 0.4 s の AM 波に対して 1:1 のインテンシティ比率で定位を補助する信号 [7] を加算したものである。刺激は 1 試行で 2 回繰り返し、SOA は 0.80 s とした。

提示する仮想振動源の位置は、図 5 に示した知覚原点を中心とした半径 5m の球面上で等間隔に配置した 120 個の点からランダムな順で選択された。

被験者は 20 代の男性 4 名、40 代の女性 1 名の合計 5 名である。実験中はピンクノイズで聴覚を遮断した。

#### 4. 実験結果・考察

仮想振動源を提示した位置と被験者が回答した位置は、水平方向と鉛直方向でそれぞれ図 6,7 のようにまとめられた。これらの図は真正面を 0 度として、緯度は上側を正、経度は右側を正としている。相関について分析すると、鉛直方向では相関係数が 0.781 で相関があり、水平方向では相関係数 0.932 で強い相関があることがわかった。この結果から、今回開発した胴体装着型の立体振動デバイスは水平方向の情報の提示が非常に得意で、鉛直方向についてもある程度定位できることがわかった。ここで 5 名の被験者のうち 1 名が、いずれの方向を提示した場合でも真正面または真背面付近に知覚していたため、この集計からは除外している。

図 8: 鉛直方向の定位結果 (赤: 緯度  $\theta < 0$ , 青:  $\theta \ge 0$ )図 9: 水平方向の定位結果 (赤: 経度  $\phi < -120$ , 黒:  $-120 \le \phi \le 120$ , 青:  $\phi > 120$ )

鉛直方向の結果について、サンプル全体の 2/3 以上が上方向への回答となる偏りが見られた。上下それぞれに提示した場合でそれぞれ線形回帰を行うと図 8 のようにまとめられた。これは、下側に提示した場合であっても上側に知覚されるケースが多いことを示している。このように鉛直方向の定位が上側に偏った原因は主に 2 つ考えられる。1 つは知覚原点の位置のずれである。本実験では知覚原点を振動モジュールの中央に設定しているが、被験者が知覚原点を下側に感じていた場合、本実験のように全球から均等に提示すると回答が上側に偏ると考えられる。これを防ぐ方法としては、手順 1 で知覚原点についてのキャリブレーション強調することが考えられる。もう 1 つは、実験の状況設定である。本実験では被験者の視点は知覚原点=球の中心より上にずれた位置に存在しており、刺激体感後に回答インターフェースを見回して回答するように伝えていた。このとき視点が上側にずれていたことで、上側に回答しやすかった可能性が考えられる。これは、知覚原点ではなく視点を中心とした球に変更することで防ぐことができると考えられる。

水平方向の結果について、サンプルのうち -120 ~ 120 度に回答する場合とそれより背面側に回答する場合で異なる傾向が見られた。それぞれで線形回帰を行うと図 9 のようにまとめられた。赤、青色のように大きく背面側に提示した場合、黒色のように前側に提示する場合と比べて、横軸の値に対して縦軸の値が大きいことがわかる。これは提示刺激が一定以上背面側に寄っていると、実際より後ろ側に

知覚されるケースが多いことを示している。このような偏りは、視界内と視界外のバイアスによって生じた可能性が考えられる。本実験では回答の際に、球上の仮想振動源の位置をイメージしてから回答インターフェースを見回して答えたい位置を示して回答するように伝えていた。しかし被験者が位置をイメージする前に見回しながら振動源の位置を探した場合、視認できる視野内と視認できない視野外で解像度に差が生じると考えられる。これは振動提示中に周囲を見回せないようにすることで被験者の行動を統制することで防ぐことが可能だと考えられる。

## 5. 結論

本稿では、身体周辺のあらゆる位置で振動源を定位させるために胴体装着型デバイスを開発し、その定位性能を測定した。その結果、水平方向および鉛直方向で定位させることが可能であることがわかった。しかし実験の手順や設定が原因で測定結果に望ましくないバイアスが生じた可能性があるため、今後は実験プランの修正を行い、また被験者を増やすことでより正確な結果を報告する。

## 6. 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 第 1 報: 方向定位可能な多点振動刺激の検討, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2021, pp. 1P3–1I4 (2021).
- [3] Ohara, G., Kikuchi, D., Konyo, M. and Tadokoro, S.: Stereohaptic Vibration: Out-of-Body Localization of Virtual Vibration Source through Multiple Vibrotactile Stimuli on the Forearms, *IEEE Transactions on Haptics*, pp. 1–6 (2024).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] Bensmaïa S, Y. J., Hollins M: *Vibrotactile intensity and frequency information in the pacinian system: a psychophysical model*.
- [7] 大原玄, 昆陽雅司, 田所諭: 外界を表現する立体振動ディスプレイ 第 8 報: 補助振動による立体振動の定位性の改善手法の提案, 第 24 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 (2023).