



外界を表現する立体振動ディスプレイ

第 5 報: 前腕部周回軌道上の振動源定位性能

Stereo Vibration Display for Representing External Environments

5th Report: Evaluation of Representation of Position of Vibration Source on Orbit around Forearm

大原 玄¹⁾, 星 裕也¹⁾, 昆陽 雅司¹⁾, 田所 諭¹⁾

Gen OHARA, Yuya HOSHI, Masashi KONYO, Satoshi TADOKORO

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: 触覚のファントムセンセーションを利用することで, 少数の振動子で立体的な位置情報を提示することが可能になる. 筆者らはこれまで前腕部を対象に, 振動デバイスと VR 映像の組み合わせにより, 物体が身体から放出される体感を表現できることを提案し, 主観評価について報告した. 本稿では 4 つの振動子で回転を提示する腕輪型デバイスを用い, 回転速度の異なる振動刺激を印加することで, 立体振動の定位性能を定量的に評価する.

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

ヒトは日常の様々な場面で体に伝わる振動を介して外界の状況や臨場感を知覚することがある. そのため VR コンテンツにおいても, 外界から身体に伝播する振動を提示することで体験のリアリティを高め, 外界の存在感をより強く表現する効果が期待できる. 本研究では, 聴覚の立体音響と同様に, 複数の振動子を用いて振動源の立体的な定位感を伝えることで, 現実の外界を知覚しているかのような体験を表現する「立体振動」ディスプレイの実現を目的とする.

複数の振動子により身体上の任意箇所に仮想的な振動源を定位させる手法として, Israr らのファントムセンセーション (PS) と仮現運動を組み合わせた方法 [1] が知られている. このように PS は, 通常, 身体表面に振動源が存在する場合を対象としている. 一方, PS を身体近傍や把持物体に拡張した研究も存在する [2][3] が, 振動源を身体内外の任意の立体的な位置に定位させる手法は確立されておらず, また提示する振動も単純な波形に限られていた.

筆者らは, 波形の振動インテンシティから振動に関するヒトの知覚量を分析し, 任意のキャリア周波数をもつ波形による振動知覚の再現を可能にする Intensity Segment Modulation (ISM) [4][5] を開発した. これにより, 任意波形を PS として提示することが可能になった [6]. また, ISM を利用することで, 知覚量 (知覚インテンシティ) に基づいた各振動子への振動の分配を行い, 立体的な PS を生起させられることを確認した. これを利用して, 足裏 [7] や前腕 [8] に振動刺激を加えて仮想的な振動源の定位感を提示することに成功した. ただし, 前腕近傍を周回する立体振動では, 体感の自然さなどの主観評価のみで, 定位性能を定量的に

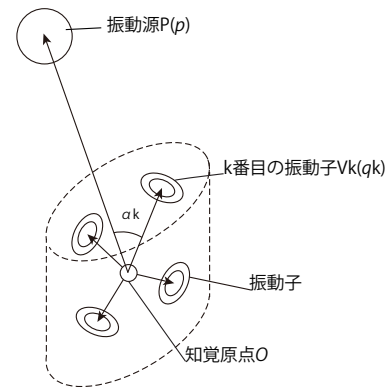


図 1: 立体振動の提示法 [4]

評価することはできていなかった.

本稿では, 前腕部近傍を周回を運動する振動源の立体振動を対象に, 振動源の回転速度を変化させた際の弁別閾を調査することで, 運動する振動源に関する定位性能を定量的に評価する.

2. 提案手法

2.1 立体振動の概要

立体振動の基本的なコンセプトは, 心理音響に基づく立体音響技術である振幅パンニング [9] が複数のスピーカの音圧の比率で音像を定位させるように, 振動源の知覚量を算出し, 振動子と振動源の定位位置の方位に基づき知覚量を分

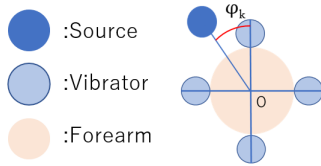


図 2: 振動子と振動源の位置関係

配することで、各振動子の振動強度を決定するものである。

2.2 振動の分配

2.2.1 振動子と振動源の幾何学的関係

図 1 のように、空間上で知覚原点 O に対して振動源の位置 \mathbf{p} と k 番目の振動子位置 \mathbf{q}_k のなす角度 α_k をもとに各振動子への分配を行う。ここで、知覚原点は複数の振動子の振動から得られる振動像の心理的な中心位置である。知覚原点に対する振動子の方向と振動源の方向が一致する場合に分配比率が最も大きくなると考えられるため、正規化した \mathbf{p} と \mathbf{q}_k の内積 u_k をもとに次節で提案する手法で分配の比率を定める。

$$u_k = \bar{\mathbf{p}} \cdot \bar{\mathbf{q}}_k = \frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{q}_k}{\|\mathbf{p}\| \|\mathbf{q}_k\|} \quad (1)$$

2.2.2 知覚インテンシティに基づく分配

分配前の振動源の振動波形に対して ISM による波形変換 [4] を行う。この変換では元波形を時分割し、分割したセグメントごとの知覚インテンシティに基づいて処理を行った後変換後の波形を出力する。

分配には、この変換の過程で現れる知覚インテンシティを利用する。知覚インテンシティを利用するのは、ヒトの振動知覚に存在する周波数依存性を考慮して振動刺激を提示する必要があるためである。

ISM で利用した Bensmaia らによる周波数スペクトルごとの知覚インテンシティの定義式を式 (2) に示す [10]。ここで、 A は振幅、 f は周波数、 $A_T(f)$ 、 $a(f)$ はそれぞれ周波数 f に依存する振動弁別閾と振動インテンシティの大きさである。

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

本稿で行った実験における振動子と振動源、知覚原点の幾何学的関係を図 2 に示す。本稿では前報 [7] と同様に、振動子 V_k の方向を示す ϕ_k を用いてインテンシティ I_k を式 (3)(4) に基づき決定する。

$$I_k = I \cdot r(\phi_k) \quad (k = 1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

$$r(\phi_k) = \frac{(1 + r_{\text{offset}}) + (1 - r_{\text{offset}})(\cos \phi_k)}{4(1 + r_{\text{offset}})} \quad (4)$$

ここで、 I は分配前のインテンシティの合計値、 r_{offset} は出力の最低値を定める定数である。

3. 運動速度の弁別閾測定

前腕部周回軌道上を運動する振動源から提示される振動について、振動源の回転周期を変化させることで恒常法に

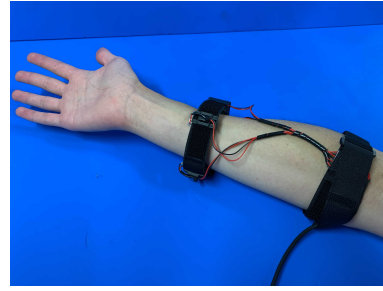


図 3: 腕輪型デバイス

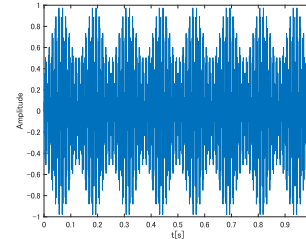


図 4: 提示波形

基づき定位性能の弁別閾を測定した。振動源を運動させたのは、刺激強度の大きい振動子に着目することで定位性能にかかわらず定位感の回答が可能になってしまうことを避けるためである。

ここで、主観的等価点から下に 25% ずれた位置を下弁別閾、上に 25% ずれた位置を上弁別閾とした。

3.1 実験装置

図 2 の位置関係に従って振動子 (TEAX13C02-8/RH Classic Audio Exciter, Tectonic Audio Labs, Inc.) を配置した腕輪型デバイス (図 3) を利用した。振動刺激の生成には Unity を利用した。Unity 上の位置関係に基づき前述の信号処理とインテンシティ分配を行い、各振動子に振動を出力した。出力の際はオーディオインターフェース (Xonar U7 Mk2)、オーディオアンプ (Syntacts Amplifiers V3.1) を経由して出力した。

3.2 実験方法

本実験は以下の手順で行った。

1. 被験者に腕輪型デバイスを装着する。
2. 各振動子から順番に振動を提示し、被験者が振動を等しく知覚するように Unity 上のゲインを調整する。
3. 実験の流れを説明し、聴覚を遮断する。
4. 周期 3.5 秒の基準刺激と試験刺激を順番に提示し、基準刺激に対する回転周期の大小を回答させる。
5. 4 を試験刺激の周期 9 種について実施することを 1 セットとし、これを 9 セット行う。

本実験で使用した刺激は式 (5) で表す振幅変調波であり、試験刺激は $3.5 + \{0, \pm 0.3, \pm 0.8, \pm 1.5, \pm 2.5\}$ 秒の 9 種である。周期の提示順はラテン方格法に基づいてカウンターバランスを排除した順番である。被験者は 20~40 代男女 6 人である。

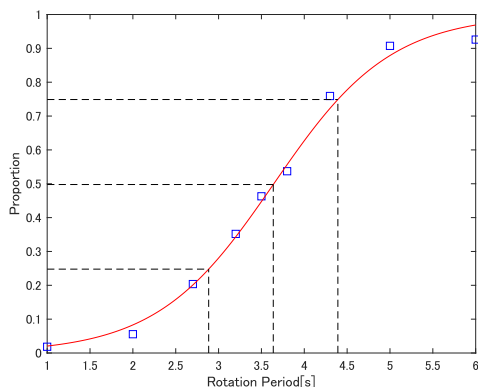


図 5: 定位実験結果

$$y = \frac{1}{4} \left(\left(3 + (\sin 2\pi t \cdot 8 - \frac{1}{2}\pi) \right) (\sin 2\pi t \cdot 400) \cdot (\sin 2\pi t \cdot 40) \right) \quad (5)$$

4. 結果

被験者の回答をまとめた結果を図 5 に示す。横軸が試験刺激の回転周期，縦軸が基準に対して遅いと回答した割合である。このとき，回答率 25%，50%，75% の代表点における周期はそれぞれ 2.88，3.64，4.39 秒であった。

主観的等価点は 3.64 秒である。また，下弁別閾は 0.76 秒，上弁別閾は 0.75 秒と求められる。

5. 考察

結果から，本稿で用いた腕輪型デバイスによる振動源定位の弁別閾は，上下ともに 0.76 秒程度の周期差であったとわかる。ここで，振動子が 90 deg ごとに配置されていることから，仮に 90 deg 以上のずれがある場合は，振動子位置のみで感じる刺激周期に注目することで弁別できてしまう可能性がある。実験結果より刺激のずれを角度に換算すると，弁別できた周期差 0.76 秒と基準刺激の角速度 103 deg/s から，78 deg (= 103 deg/s × 0.76 s) 程度の位置のずれがあれば振動源の位置を弁別できたといえる。このずれは 90 deg 以下であるため，被験者は単に振動子位置の振動で区別しているのではなく，PS によって生じた振動源により回転速度を知覚していたと言える。すなわち，提案手法により前腕部の周回軌道に振動源を定位できており，0.76 秒程度の回転周期の違いを知覚できたといえる。

弁別閾を比較すると，下弁別閾に対して上弁別閾のほうがやや小さい傾向が見られた。これは，周期の大きい刺激を小さい刺激より正確に定位できていることを示している。したがって運動する振動源の定位において，運動速度が遅くなるよりも，速くなる方が区別しやすかった可能性がある。

また，図 5 から，周期 1，2 秒の回答率と 5，6 秒の回答率を比較すると，1，2 秒の差に対し 5，6 秒の差が小さいことがわかる。このことから，振動源の運動速度が一定以上遅くなると定位性能が頭打ちになることを示唆していると考えられる。

6. 結論

本稿では回転速度の異なる振動刺激を提示することで，振動源定位性能の評価を行った。その結果，デバイスの定位性能を弁別閾の形で定量的に評価し，立体振動の提示が可能であることを確認できた。今後は視覚刺激や聴覚刺激との統合が定位に与える影響を評価する。

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] Kim, Y., Lee, J. and Kim, G. J.: Extending "out of the Body" Tactile Phantom Sensations to 2D and Applying It to Mobile Interaction, *Personal Ubiquitous Comput.*, Vol. 19, No. 8, p. 1295–1311 (2015).
- [3] Tawa, S., Nagano, H., Tazaki, Y. and Yokokohji, Y.: Extended phantom sensation: vibrotactile-based movement sensation in the area outside the inter-stimulus, *Advanced Robotics*, Vol. 35, No. 5, pp. 268–280 (2021).
- [4] 菊池大輝, 昆陽雅司, 田所諭: 高周波による振動体感の空間表現を実現する Intensity Segment Modulation ライブラリの実装と評価, 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).
- [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] 菊池大輝, 昆陽雅司, 田所諭: 1P1-M08 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 (触覚と力覚), ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2021, (2021).
- [7] 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 2 報: 立体振動提示装置の設計, 第 26 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 (2021).
- [8] 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).
- [9] Pulkki, V.: Virtual Sound Source Positioning using Vector Base Amplitude Panning, *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol. 45, No. 6, pp. 456–466 (1997).
- [10] Bensmaïa, S., Hollins, M. and Yau, J.: Vibrotactile intensity and frequency information in the Pacinian system: A psychophysical model, *Perception Psychophysics*, Vol. 67, No. 5, pp. 828–841 (2005).