



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

Stereo Vibration Display for Representing External Environments
2nd Report: Design of a Stereo Vibration Display

稲垣匠馬¹⁾, 昆陽雅司¹⁾, 田所諭¹⁾

Takuma INAGAKI, Masashi KONYO, and 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, inagaki.takuma@rm.is.tohoku.ac.jp)

概要: 立体音響のように体外の任意の位置にある振動源の体感を定位させる技術の確立を目的とする。筆者らはこれまでに足裏部に設置した 4 つの振動子に知覚される振動のインテンシティを配分することで体外に振動源を定位させる方法を提案した。本稿では、定位の精度向上をめざして、足裏部の振動提示装置を改良した。被験者実験の結果、定位の精度が向上することが確認された。また、足のつま先部と踵部の知覚感度を補正する必要性についても検討を行った。

キーワード: 触覚, 振動刺激, 方向定位

1. はじめに

ヘッドマウントディスプレイ等を用いた VR 体験において、触覚技術を組み合わせることは臨場感、操作性といった体験の質の向上が期待される。本研究では特に仮想空間上で物体やキャラクターが、ユーザの周りで移動しているような場面を想定し、それらから発せられる振動の体感が方向感をもってユーザに伝わるような立体的な触覚体感技術を確立することを目標とする (図 1)。類似する技術として、立体音響では、複数のスピーカに音源を配分することにより仮想的な位置の音源を定位させることが可能である。本研究でも体に接触する複数の振動子を用いて振動を配分することで外界の振動源を定位させる技術を確認する。

従来、複数の振動源を用いて仮想的な振動源を定位させる触覚知覚の現象としてファントムセンセーション (Phantom Sensation: PS) が知られている。Israr らは PS を仮現運動と合わせて用いることで格子状に配置した振動子で身体上の任意の位置に刺激を定位させる手法を提案している [1]。また、田和らは、両手に振動子を持ち左右の振動子の強度を連続的に変化させることで、PS を体外の位置に生成し、両手の外側を含む直線上を振動が移動する感覚を提示している [2]。しかし、従来の PS の生成手法は、正弦波を前提としており、音響信号から振動刺激を生成したり、計測された振動を提示するための、任意の振動波形に適用する方法は確立していない。筆者らは、ヒトが知覚する振動のインテンシティに着目し、Intensity Segment Modulation (ISM)[3]と呼ばれる方法を用いて知覚インテンシティを算出し、振動源と複数の振動子の位置に基づいて知覚インテンシティを分配することで振動源の定位感を提示できることを確認している [7]。前報の足裏部に設けた 4 つの振動子の実験結果



図 1: 立体振動のイメージ図。

では、体の前方と後方でわずかに定位精度の差が見られたことから、振動提示装置の精度を向上させる必要性和、提示部位ごとに振動強度の補正を行う必要性が示唆された。

そこで、本研究では、新たに足の裏に安定した振動刺激提示する装置を開発し、新規デバイスでの定位性能の評価を行うとともに、足裏部の提示部位の感度により刺激強度の補正を行う必要性を確認する。

2. 立体振動

2.1 ISM

本研究では知覚インテンシティに基づいた振動の提示をするにあたり、ISM[3]を用いる。ISM は振動高周波成分の知覚インテンシティモデルと、高周波成分の包絡線成分の知覚特性に基づき、変調を行う手法である。ISM を用いて振動を変換することで元の振動の感覚を維持したまま任意の周波数の振幅変調波に置き換えることができる。知覚インテンシティモデルの定義式を式 (1) に示す [4][5]。ここで、

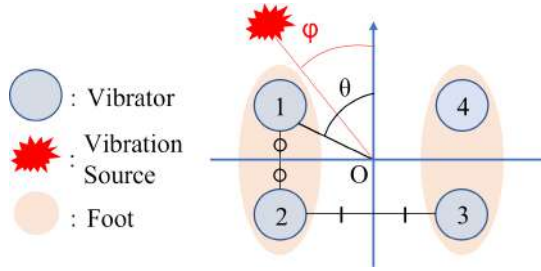


図 2: 角度の定義.

A は振動の振幅, f は周波数, $AT(f)$ および $a(f)$ は周波数 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を表す指数である.

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

これまでの PS などでの分配法は正弦波を前提に振幅情報を利用して, 振動強度を特定の勾配式を用いて複数の振動子に分配する方法がとられてきた. 筆者らは, 振動の振幅から得られる強度ではなく, 周波数依存性をもつヒトの知覚インテンシティを ISM により算出することで, 元の振動波形ではなく, 知覚インテンシティを分配する方法を提案している [7]. 分配されたインテンシティ I から振動刺激を生成する際は振幅変調波を利用し, 下記の式 (2) を用いることで任意のキャリア周波数 f_c をもつ振幅変調波の振幅 A を求めることができる.

$$A = AT(f_c) \left(I(f)^{\frac{1}{2a(f_c)}} \right) \quad (2)$$

2.2 インテンシティ分配法

知覚インテンシティを利用することで, 振動刺激に対する知覚の非線形性を考慮できることから, 知覚インテンシティは線形性を仮定し, 振動源と振動子の位置の幾何的關係から, 知覚インテンシティの分配を行う.

振動子と振動源の幾何的關係を図 2 に示す. この時, 横軸は前後の振動子の中心, 縦軸は左右の振動子の中心を通るものとし, 角度は縦軸とのおなす角 (反時計回りが正) である.

本研究では以下の式 (3), (4) に基づき各振動子のインテンシティを決定する.

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

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

ここで, k は振動子の番号に対応し, I は提示を行うインテンシティの合計値, r_{offset} は出力の最小値を決定するための定数である. r_{offset} は出力する最小のインテンシティ I_{\min} に対し式 (5) を満たすように決定する. (本稿では $r_{\text{offset}} = 0.2$)

$$I_{\min} \cdot \frac{r_{\text{offset}}}{2(1 + r_{\text{offset}})} \geq 1 \quad (5)$$

式 (3), (4) を用いた理由は (I) 現実世界の幾何的關係性を反映している (II) 横軸に関して対称にすることで $r(\theta_k)$

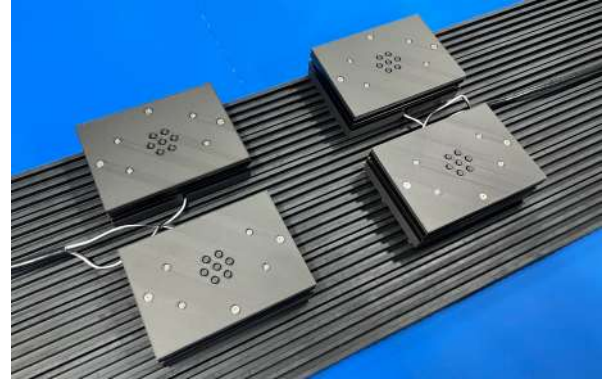


図 3: 振動提示装置外観.

の和が一定で $r(\theta_k)$ の増減通りの出力の変化が見込めるためである. また, $\theta_1 = \alpha$ としたとき各振動子の角度は幾何的な関係性より, $\theta_2 = \pi - \alpha$, $\theta_3 = \pi + \alpha$, $\theta_4 = 2\pi - \alpha$ となる. なお, 本稿では $\alpha = 60^\circ$ として実験を行った.

3. 実験装置

足裏に刺激を行うために新たに振動提示装置を開発した (図 3).

3.1 構成

本装置は提示部位ごとに分かれており同じ構造の合計 4 つの装置で構成される. この装置 1 つの構造図を図 4 に示す. 体重を支える筐体部と振動を提示する振動部から成り立っている. 振動部は振動提示部とばね, 振動子 (Vp4: Acoupe Laboratory, Inc.) で構成されている. ばねはシャフトを中心に通すことで固定しており, シャフトの一端は筐体の天井に固定されている. 反対側はワッシャによりばねを固定している. また, ばねは振動提示部の上下に取り付けられており, 常に上下のばねが自然長よりも短い状態を維持している. これにより振動系が一定のばね定数で駆動することができ, ユーザの体重などによらずに安定した周波数特性を実現している.

各装置は防振マットの上に配置, 固定する. 防振マット上に配置することで各装置間の振動のアイソレーションを図っている. また, 防振マットの溝を利用してユーザの足の長さに合わせて装置の幅を調整することができる.

各振動子の制御は Unity で行い, オーディオインターフェース (Octa-Capture: Roland Corporation), オーディオアンプ (KTP-600: ALPS ALPINE CO., LTD.) を経由し波形を出力する.

3.2 周波数特性

振動提示装置の周波数特性を図 5 に示す. 共振周波数は 50 Hz 付近になっている. これは ISM 変換後のキャリア周波数を 200 Hz で想定しているため, この周波数を避けた設計とした.

4. 足の部位ごとへの補正の有無についての検討

足の部位ごとに振動の知覚特性が異なる事が知られている [6]. 筆者らのこれまでの研究でもかかと側での振動定位

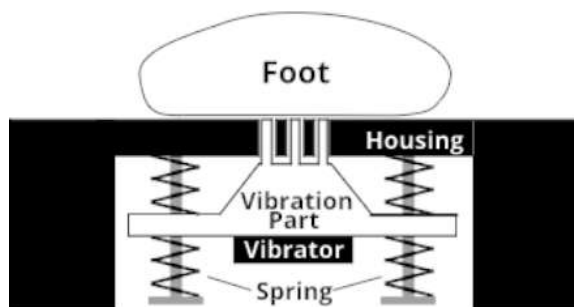


図 4: 振動提示装置構造図。

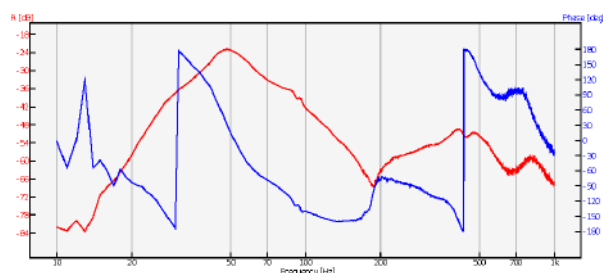


図 5: 振動提示装置の周波数特性。

の際につま先側よりも小さく知覚されることが確認されている [7]。このことから、提示部位ごとに補正を加えることにより定位の精度が向上するか確認を行った。

4.1 方法

まず、階段法によりつま先側の刺激を基準にかかと側の刺激が同等の強度で知覚される振幅 A を求める。つま先側での振幅 B と求めた振幅 A をインテンシティ I_A, I_B に変換後、補正值 $C = I_A/I_B$ を決定する。その後、かかと側の出力インテンシティに対して補正值 C をかけて、方向定位実験を行い、提示した刺激がどの方向から知覚されるか回答させた。被験者は 20 代男性 3 名である。

4.2 結果

結果を図 6, 図 7 に示す。上下法の結果から $C \geq 0.9$ 以上の被験者群 1 (1 名) と、 $C \leq 0.7$ の被験者群 2 (2 名) を別々に集計している。結果から被験者群 2 の結果は被験者群 1 よりも定位の精度が落ちており、後ろ側 ($\theta = 90^\circ \sim 270^\circ$) の刺激が前寄りに定位されている。これは過度に補正をかけたことにより生じていると考えられる。このことから、過度な補正は定位の精度を低下させることが示唆された。今後、部位ごとに補正が必要かは、補正法も含めてさらに検討する必要がある。

5. 振動源の定位実験

新たに作成したデバイスで体外の振動源の方向の定位が可能か実験を行った。なお、本実験では 3.3 での検討結果より提示部位ごとの強度補正は行っていない。

5.1 実験方法

本実験は以下の流れで行った。

1. 被験者を椅子に座らせ、足を刺激装置に乗せる。
2. 実験の流れを説明し、聴覚を遮断する。
3. 基準刺激と試験刺激を順番に提示し強度を回答させる。

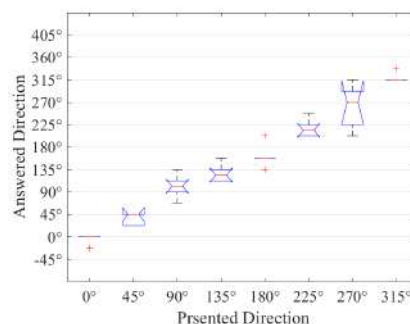


図 6: 補正有りでの方向定位実験結果 (被験者群 1) 。

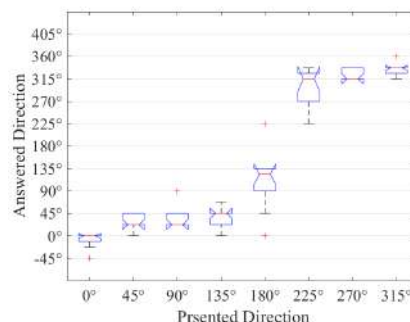


図 7: 補正有りでの方向定位実験結果 (被験者群 2) 。

4. 再度、試験刺激を提示し震源の方向を回答させる。
5. 3, 4 を刺激条件を変えて 50 試行行う。

本実験で使用した基準刺激は式 (6) で表される振幅変調はである。波形を図 8 に示す。

$$y = \sin\left(2\pi \cdot \frac{t}{2}\right) \sin(2\pi \cdot 10t) \sin(2\pi \cdot 400t) \quad (6)$$

なお、試験刺激は基準刺激をもとに ISM とインテンシティ分配を行いキャリア周波数を 200 Hz として生成している。試験刺激の生成条件は $0 \sim 315^\circ$ を 45° 刻みにした 8 条件とし、合計のインテンシティは一定にした。50 試行の内、48 試行は 8 条件を 6 試行ずつ行い、2 回は強度を 2 倍にしたダミーの刺激を提示した。主観的強度は、基準刺激を 10 として、2 倍の強さを感じたら 20、半分の強さを感じたら 5 という基準で自由な数値を回答させた。方向は、 $0^\circ \sim 337.5^\circ$ (22.5° 刻み) に対応した $0 \sim 15$ の数字で回答させた。

被験者は 20 代男女 5 人であり、刺激条件は被験者ごとにランダムな順番で提示した。

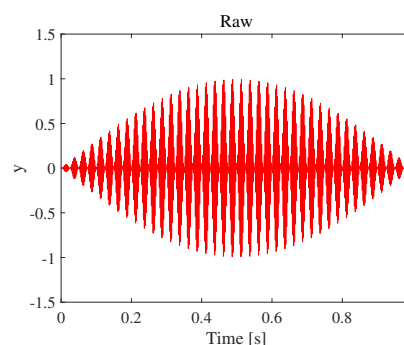


図 8: 基準刺激波形。

5.2 実験結果

実験結果を図 9, 10 に示す. 方向については, すべての角度で提示した角度に対して $\pm 22.5^\circ$ 以内に中央値が収まっており, 方向の定位感を提示できていることが確認できる. また, 主観強度についてはすべての角度で四分位範囲が 2 以下となっており, 角度ごとでの分散が小さくなっている. 前報 [7] と比較しても分散が小さくなることが確認された.

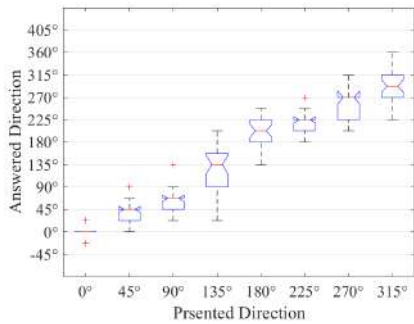


図 9: 方向の回答結果.

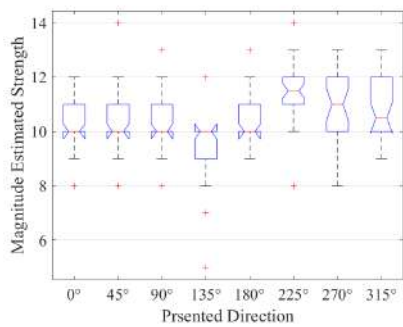


図 10: 主観強度の回答結果.

5.3 考察

方向定位の結果より 135° 付近において, 分散が大きいことから定位精度が低いことがわかる. また, 主観強度の結果から 135° で弱く知覚され, 225° 付近では強く知覚されていることが確認できる.

そこで, 全提示装置の周波数特性の計測を行った. 計測で得られた各提示装置の 200 Hz における出力を表 1 に示す. この結果から右後ろ ($\theta = 240^\circ$ 方向) の提示装置の振幅が大きく, 左後ろ ($\theta = 120^\circ$ 方向) の提示装置の振幅が小さいことが確認できる. このことから, 提示装置の出力強度の個体差により方向定位と主観強度の解答が乱れたと考えられる.

表 1: 各提示装置の 200 Hz での出力

vibrator	Gain
Front left	1.80×10^{-2}
Back left	1.58×10^{-2}
Back right	2.74×10^{-2}
Front right	1.33×10^{-2}

6. まとめ

足裏への立体振動提示のために新たに振動提示装置を開発した. また, 提示部位ごとの強度補正の必要性について検討を行い, 過度な補正が定位精度の低下につながることを確認した. そして, 新たな提示装置を用いて補正無しでの方向定位実験を行い, 方向の定位が可能であることを確認した. 今後はさらなる定位精度の向上と, どの方向の刺激に対しても知覚強度が一定となるように提示装置の改善を行う.

参考文献

[1] Israr, A et al. : Tactile brush: Drawing on skin with a tactile grid display.” In Proc. of CHI’11, ACM, 2019–2028.

[2] Tawa, Syunsuke et al. : Extended phantom sensation: vibrotactile-based movement sensation in the area outside the inter-stimulus. Advanced Robotics (2020), 1–13, 2020.

[3] K. Yamaguchi, M. Konyo and S. Tadokoro : Sensory Equivalence Conversion of High-Frequency Vibrotactile Signals using Intensity Segment Modulation Method for Enhancing Audiovisual Experience. Proc. 2021 IEEE World Haptics Conference, pp. 674–679, 2021.

[4] S.Bensmaïa M.Hollins and J.Yau : Vibrotactile intensity and frequency information in the pacinian system: A psychophysical model. Attention, Perception, & Psychophysics, vol.67, no.5, pp.828–841, 2005.

[5] S. Bensmaïa and M. Hollins : Pacinian representations of fine surface texture. Perception & psychophysics, vol. 67, no. 5, pp. 842–854, 2005.

[6] P.M. Kennedy and J.T. Inglis : Distribution and Behaviour of Glabrous Cutaneous Receptors in the Human Foot Sole. J. Physiology, vol. 583, no. 3, pp. 995-1002, 2002.

[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 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 2021 in Osaka, 1P3-I14, 2021.