



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

菊池大輝¹⁾, 昆陽雅司¹⁾, 田所諭¹⁾

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: 身体に設置した少ないアクチュエータで広範囲の位置に振動を体感させる方法として, ファントムセンセーション (PS) が知られている. 従来の PS は正弦波のような単純な波形を仮定しているため, 衝突振動など任意の波形に適用することができない. 筆者らはヒトが知覚する高周波振動の知覚インテンシティを利用して PS を制御する方法を提案している. 本稿では提案手法により刺激提示位置の制御および PS でも任意振動の触感の維持が可能であることを, 振動定位と触感の識別実験により実証する.

キーワード: 振動インテンシティ, 振動提示, ファントムセンセーション

1. 緒言

近年, 触覚刺激によって VR などの体験を拡張することの有効性が知られている. 振動触覚を様々な位置に与えるための研究は様々な取り組みがある. 特に, 少ないアクチュエータで身体上の様々な位置に刺激を与える方法として, ファントムセンセーション (PS) を利用する方法が提案されている [1].

一般的に, PS を利用して 2 点間の任意の位置に振動刺激を提示するために, 単一正弦波や矩形波などの振幅をパラメータとして振動強度を設定し, 振動子の振動強度を位置に応じて勾配をつけて提示する手法が用いられる. この方法は単純な波形に対して適用可能であるが, 衝突振動など任意の振動を表現する場合, 単にゲインを調整するだけでは振動知覚の周波数特性を考慮することができず, 結果として元の波形の触感を維持することができない.

任意波形の PS の生成を行う方法として, 筆者らは Intensity Segment Modulation (ISM)[2] を用いた手法を提案し, それにより刺激強度を一定に保ちながら PS を生起させられることを示した [3]. しかし, 提案手法により任意波形の振動刺激による触感が保たれているかどうかは定量評価されていなかった.

本稿では前報 [3] で提案した手法により触感の異なる複数の振動刺激を前腕部に提示し, 触感の違いを識別する実験を行う. 実験では提案手法により PS を生起させた場合と振動子直下に与えた場合を比較することで, 提案手法が触感を維持できているかどうかを確認する. また, 提示した刺激の位置も回答させることで PS による刺激提示位置の制御が可能であるかも調査する.

2. 提案手法

前報 [3] で提案した手法では, 高周波成分の触感を維持して振動波形を AM 変調波に変換する技術である ISM を利

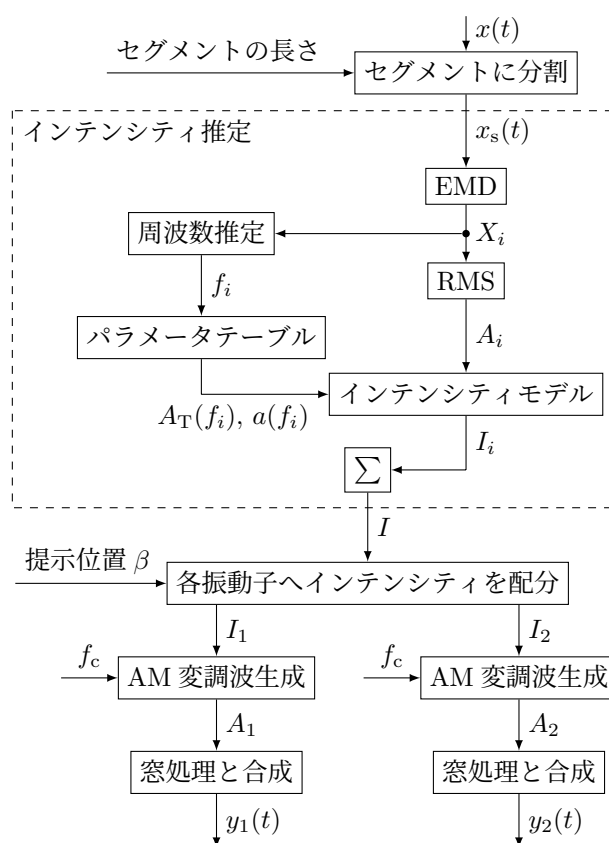


図 1: 提案手法のブロック図

用する. 変換の途中で現れる振動インテンシティを各振動子に配分することで PS を生成する. 提案手法の処理の流れを図 1 に示す.

ISM では 100 Hz 程度以上の高周波成分からなる信号 $x(t)$ を 5 ms 程度のセグメントに時分割し, 各セグメント $x_s(t)$ に対して変換処理を行う. セグメントは半分ずつ重なるように切り出され, 変換後に合成される. セグメントごとに行わ

れる処理は以下のようなものである。まず、セグメントを経験的モード分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD) により基底信号に分解する。EMD とは、音声信号のような非定常な波形を固有モード関数 (Intrinsic Mode Function, IMF) という単純な基底信号に分解する方法である。

次に、EMD により得られた i 番目の基底信号 X_i から RMS 振幅 A_i の推定と代表周波数 f_i の推定を行い、パチニ小体の知覚モデル [4] から得られる式 (1) から基底信号ごとの振動インテンシティ I_i を得る。セグメントごとの振動インテンシティ I はすべての基底信号について I_i を総和することによって得られる。

$$I_i(f_i) = \left[\left(\frac{A_i}{A_T(f_i)} \right)^2 \right]^{a(f_i)} \quad (1)$$

得られた振動インテンシティ I を式 (2) により 2 つの振動インテンシティ I_1, I_2 に分離し、それぞれに対して続く処理を適用することで PS を生起させるような振動波形を得る。ここで、式 (2) の β は刺激の提示位置 ($0 \leq \beta \leq 1$)、 γ は振動刺激の強度が PS 生起時と振動子直下で等しく感じられるように調整するための指数パラメータである。

$$I_1 = (1 - \beta)^\gamma \cdot I, \quad I_2 = \beta^\gamma \cdot I \quad (2)$$

分離した振動インテンシティに対してそれぞれ式 (3) を適用することで、振幅 A_1, A_2 、キャリア周波数 f_c の正弦波が得られる。最後に、セグメントごとに得られた正弦波をハニング窓を掛けながら足し合わせて変換後の振動波形 $y_1(t), y_2(t)$ を得る。

$$A_k = A_T(f_c) \cdot I_k^{\frac{1}{2a(f_c)}} \quad (k = 1, 2) \quad (3)$$

3. 実験方法

提案手法により惹起する PS の位置と触感の識別実験を行った。提示刺激は MATLAB により波形の変換と提示を行い、オーディオアンプ (NS-10G, Nobsound) で出力した。振動子にはオーディオエキサイタである TEAX13C02-8 RH (Tectonic) を 3D プリンタで造形したケースに取り付けたものを使用した。

被験者は 20 代男女 5 人で、全員が右利きである。図 2 のように被験者の右前腕部の 2 点に 6 cm の間隔を空けて振動子を取り付けた。また、提案手法で用いる刺激提示位置は手首側振動子の位置を $\beta = 0$ 、肘側振動子の位置を $\beta = 1$ とした。刺激は図 3 に示す 4 種類の波形を ISM によりキャリア周波数 200 Hz の振動に変換したものとした。図 3 の (A)、(B) は式 (4) の F_0 を 400 Hz、600 Hz としたもので、(C)、(D) は式 (5) について同様にしたもので、キャリア周波数 F_0 の違いによる全体的なインテンシティの差と、インテンシティの変動の差に着目した波形となっている。

$$y(t) = \sin(2\pi t) \sin(2\pi F_0 t) \cdot \frac{1 + \sin(2\pi \cdot 50t - \frac{\pi}{2})}{2} \quad (4)$$

$$y(t) = \sin(2\pi t) \sin(2\pi F_0 t) \quad (5)$$

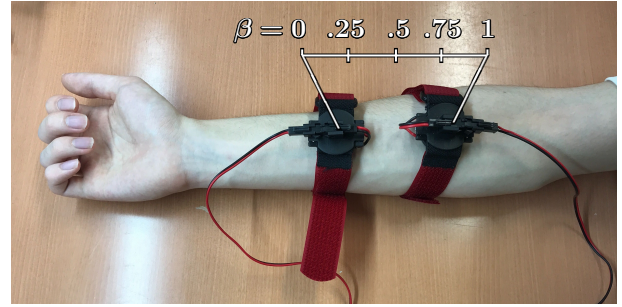


図 2: 前腕部に装着した振動子と刺激提示位置の対応

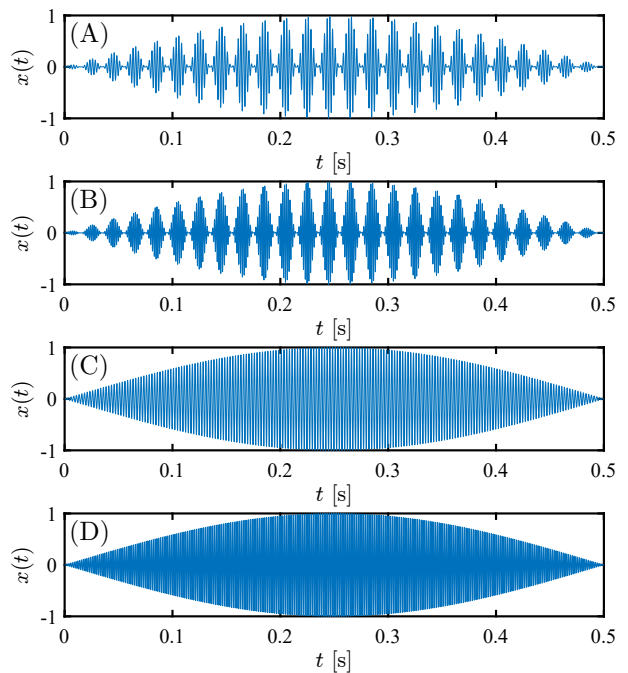


図 3: 変換した 4 種類の波形

3.1 強度調整用パラメータの同定

実験を始める前に、2 点の刺激強度が等しく感じられるようにバンドの締め付け具合を調整し、式 (2) の強度調整用パラメータ γ を二重階段法により同定した。 γ の同定は、被験者に刺激提示位置 β を変えた 3 つの刺激を 0.5 秒の間隔を空けて $\beta = 0, 0.5, 1$ の順番で提示し、 $\beta = 0.5$ の刺激強度が他の 2 つと同じであるかどうかを回答させることで行った。同定は上昇系列では $\gamma = 0.025$ 、下降系列では $\gamma = 2.0$ の刺激から始まり、被験者が刺激強度は等しいと答えるまで 0.1 ずつ変化させた。その後は変化の方向を反転し、被験者が刺激強度は異なると答えるまで 0.05 ずつ、それ以降は 0.025 ずつ増減させた。 γ を増減させる方向が各系列で 10 回反転するまでこれを行い、反転した時の値を平均して γ を求めた。

3.2 位置と触感の識別実験

被験者には振動刺激を 2 回、1 秒の間隔を空けて与えた。1 回目は振動子直下 ($\beta = 0$) に、2 回目は図 2 に示す 5 つの位置からランダムに 1 つ選んで提示した。また、触感 は図 3 に示す 4 種類からランダムに 2 つ選んだ。被験者は 2

つの振動刺激を感じた後、2つの触感および強度が等しいかどうかと、2回目の振動刺激の位置を上記の5つの選択肢から回答した。聴覚による影響を避けるため、被験者にはピンクノイズを流したヘッドホンを装着し聴覚を遮断した。

刺激の提示および回答の前に、被験者に予め刺激を与え、刺激と提示位置を対応付ける訓練を行った。具体的には、触感が図3の(A)である刺激を $\beta = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$ の順に1秒の間隔を空けて提示することを5回行った。試行回数は2つの触感の組み合わせ16条件と位置5つからなる80の実験条件につき4回ずつ、さらに振動子直下のみの触感識別結果を集計する際に試行回数を合わせるため、 $\beta = 0, 1$ の2条件については追加で6回ずつ、計512回行った。また、被験者の疲労による影響を防ぐため、30試行ごとに休憩を設けた。実験にかかった時間は被験者1人につき1時間半程度であった。

4. 結果と考察

強度調整用パラメータ γ の平均値は0.57で、同定された値の範囲は0.48から0.65であった。表1は触感の組み合わせごとに2つの触感は同じであると答えた割合を百分率で示した表である。各行は1回目の触感、各列は2回目の触感を表し、1行目および1列目から順に図3の(A), (B), (C), (D)に対応している。表1(a)は1回目を振動子直下に、2回目をPSを利用して提示した場合の結果である。表1(b)は1回目、2回目ともに振動子直下に刺激を与えた場合の結果である。いずれの場合も2つの触感が同じである場合に正答率が80%を超えているなど、2つの表の間に同様の傾向が見られた。被験者数が少ないため統計的な検討はできないが、本実験では提案手法によりPSを生起させても触感を維持できていることが示唆されていると考えられる。

図4は刺激の提示位置と正答率の関係を示したグラフである。本実験では被験者の選択した提示位置が厳密に想定する位置と一致する場合と、選択が1つずれていても正答とみなす場合で2つの正答率を計算した。厳密に一致する場合の正答率はチャンスレベルよりは高いものの、全体的に低い。このような結果となった理由としては、前腕部の2点弁別閾の広さが影響している可能性が考えられる[5]。

1つまでずれを許容した場合の正答率はどの提示位置でもチャンスレベルより高く、提案手法による刺激提示位置の制御はある程度できていると考えられる。また、提示位置が肘($\beta = 1$)に近づくにつれて正答率が高くなる傾向が見られるが、これは肘の周辺は前腕部と比べて位置を識別する能力が高いという先行研究の結果と一致する[6]。

5. 結言

本稿では高周波振動に対する知覚インテンシティを用いてPSを生起させる手法を提案し、提案手法により触感の識別および刺激提示位置の制御が可能か調査した。その結果、提案手法によりPSを生起させても触感を維持できると、位置の制御が可能であることが示唆された。今後は被験者を増やして結果の統計的な検討を行う予定である。

表1: 2つの触感は同じであると答えた割合(%)

(a) 1 回目は振動子直下,
2 回目は PS 刺激の場合

1 回目の触感

(A)	86	42	22	2
(B)	51	86	24	8
(C)	18	17	84	31
(D)	2	16	41	83

(A)

(B)

(C)

(D)

2 回目の触感

(b) 1 回目, 2 回目とも
に振動子直下の場合

1 回目の触感

(A)	90	51	31	2
(B)	45	89	22	11
(C)	19	19	85	42
(D)	5	18	31	86

(A)

(B)

(C)

(D)

2 回目の触感

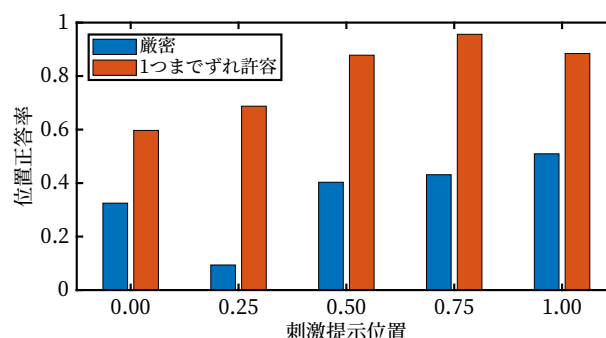


図4: 刺激提示位置と正答率

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] 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).
- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] Barghout, A., Cha, J., El Saddik, A., Kammerl, J. and Steinbach, E.: Spatial resolution of vibrotactile perception on the human forearm when exploiting funneling illusion, in *2009 IEEE International Workshop on Haptic Audio visual Environments and Games*, pp. 19–23 (2009).
- [6] Cholewiak, R. W. and Collins, A. A.: Vibrotactile localization on the arm: Effects of place, space, and age, *Perception & Psychophysics*, Vol. 65, No. 7, pp. 1058–1077 (2003).