

触覚刺激の合成手法に関する研究

梶谷 肇, 池井 寧
首都大学東京

和文抄録

本論文では、振動ピンの振動周波数を混合した合成触覚刺激の性質について議論する。ヒトの皮膚において感度が高い250 Hzと50 Hzの周波数成分を混合した2周波数混合刺激を対象とした。生成方法は、基礎的なsin波の算術和による合成方法および振幅変調による合成方法を調査した。両手法によって生成された同成分の混合刺激は、触覚における判別の難度は低くなかった。また250 Hz (30 μ m) に50 Hzを混合した場合の差閾の積算の結果は、振幅変調による合成のほうが個人差は小さく、算術和による合成に比較して、より広範囲の触覚提示に適すると見られた。以上より、両合成方法が持つ触覚的な利点を含む性質に関する基礎的な知見が得られた。

Frequency blending methods for tactile stimulation

Hajime Kajitani and Yasushi Ikei
Tokyo Metropolitan University

Abstract — This paper describes the sensation differences in the characteristics of the frequency mixtures generated by the amplitude modulation and the arithmetic sum. The stimulus mixture was generated from 250 Hz and 50 Hz where the sensitivity of human skin takes peaks. The difference between two mixtures was not easy to distinguish. Moreover, we measured the number of levels that could be compiled with discriminational threshold regarding 50 Hz amplitude increase in the constant 250 Hz amplitude (30 μ m). The individual difference was smaller in the amplitude modulation. The amplitude modulation is more suitable for presenting the sense of touch in this sense.

1. はじめに

現在、視覚聴覚に対する情報提示技術は高度に進展しており、視覚や聴覚に限定すれば非常にリアリティのある提示を行うことが可能である。しかしながら触覚に対する高度な提示は、視覚聴覚に比べて実用化が遅れており、特に対象表面のテクスチャの感覚を任意に提示できる汎用な方法は未だ確立されていない。触覚への高度な提示が可能となれば、合成3次元空間において、より現実感のある仮想環境を提示することができ、人間の有する多様な感覚を利用した高品質な情報伝達が可能である。

本研究では、対象表面の材質や比較的小さな形状の特徴に起因する触覚を提示するディスプレイとして振動ピン配列型の触覚ディスプレイ、TextureDisplay2Rを開発している。このディスプレイを用いて、複数の周波数を混合提示する方法論を中心に研究を進めているが、可能な生成方法は複数存在し、それらの生成方法による混合周波数の触覚の違いや性質の相違に関する知見はほとんど得られていない。触覚は、実世界の対象との

接触の中で発生する多様な刺激パターンに基づいた、非常に複雑な感覚であるので、様々な生成方法で合成された異なる触覚の性質が明らかとなれば、より多様な表現を触覚ディスプレイで提示できる可能性が高まる。

そこで本研究では、2周波数の混合方法の相違を対比し、成分比が同一でも混合方法が異なることによる多様な触覚の生成を可能とするため、それらの感覚の特性を調査する。

2. 触覚と振動受容特性

2-1 皮膚感覚の受容器

皮膚は外界の環境から加えられる物理的の刺激を受容する感覚器を備えている。指や手の掌面といった無毛部は、感覚受容のために特化した部分で、受容器の分布密度が高い。触覚に関する受容器は、機械的な刺激によって興奮するので、機械的受容器とも呼ばれ、4種類が存在する。順応が遅い受容器として、主として圧刺激に反応するメルケル細胞 (Merkel cell) および剪断的の刺激に反応するルフィニ終末 (Ruffini ending) がある。順応が

早く、主として振動刺激を捉える機械的受容器としては、マイスナー小体 (Meissner corpuscle, MC) とパチニ小体 (Pacian corpuscle, PC) があり、これらは受容器の神経分布密度及び特性周波数が異なる。MC, PC の分布密度は、指先でそれぞれ140 units/cm² および20 units/cm² 程度である。MC は真皮最浅部に存在し、受容野は直径2~3 mm程度で境界は鮮明である。PC は真皮下部から皮下組織に存在し、受容野は大きく境界は不鮮明である。これらの特徴によれば、PC よりもMC の空間分解能が高いことが予想される。

2-2 振動受容特性

刺激強度が比較的小さい場合に、MC は、20~40 Hz 程度の周波数帯域の振動刺激に対して、最も振幅閾値が低い。PC は、200~300Hz 程度の周波数帯域の振動刺激に対して最も振幅閾値が低く、およそ250 Hz に最小閾値を有する。但し、刺激強度が増加すると両者の特性帯域はその領域を重複する。振動刺激に関する絶対閾は、右手拇指球において計測した結果によれば、50 Hz で約2 μm, 250 Hz で約0.1 μm となっている。従って、絶対閾はPC の帯域の方が小さく、低振幅の刺激でも感覚を生じて、ディスプレイにおいて有効に利用できる領域が広い。刺激の強度と感覚の強度の関係を表す感覚尺度は、ベキ関数で近似されるような非線形性を有することが知られている。また振動に対する感覚強度は、刺激の提示条件 (提示部位、接触子面積、接触強度、接触点近傍の皮膚拘束) に大きく依存することも分かっている。したがって、複数の生成方法で生成された混合振動刺激を利用する際も、ディスプレイとして利用する局面の近傍の条件において、各生成方法の混合周波数の感覚尺度や順応特性の違いから、生成方法による特性の特定が必要であり、以下にその調査結果を示す。

3. 振動刺激提示装置

本研究では、著者らが開発している触覚ディスプレイ (TextureDisplay2, TD2) への適用を念頭に知覚特性を調査するため、同ディスプレイの構成について概要を述べる。TD2 は、直径0.5 mm のピアノ線で作られた刺激提示ピンを、2 mm間隔で、5×10 の格子状に配置した振動刺激提示型の触覚ディスプレイである。ピンの駆動は、積層型ピエゾアクチュエータで行い、振動周波数は40~410 Hz (共振のため261Hz~309Hzは除く)、最大振幅約60 μm までの範囲で256 通りに振幅を設定することができる。

このTD2 の刺激提示条件を含む領域について計測を行うために、図1に示す振動刺激提示装置を構築して用いた。本装置は、3本の刺激提示ピンを有し、ピンの振幅を詳細に制御するために、3台の精密駆動モータ (Dual-Mode Lever System 300B, Aurora Scientific Inc.) を使用している。モータの回転軸先端に付けられたレバーに、直径0.5 mm, 長さ10 mm, 質量約0.65 g のピアノ線を接

触ピンとして取り付けられている。この駆動モータの出力分解能は、1 μm, 0.3 mN で、位置制御 (振幅制御) 時に発生している力 (ピン先端における力) を同時に計測可能である。制御用PCとの接続には、16 bit DA ボードおよび12 bit AD ボードを用いた。また、ピンの下にCCD カメラを設置し、ピンが指に接する箇所をTV モニタで確認できるようにした。手掌と指を安定させるアクリル板の手置き台の指先部分に、矩形状で6×27 mm の大きさの開口部を設け、その中央部長手方向の直線に沿って3本のピンが配置されて露出している。ピン先端の高さは、指を置いた場合に指に接触しない状態から、開口部上面から上方へ4 mm程度、突出する位置までの範囲に設定可能である。本実験では、中央のピン1本だけを使用し、他のピンは指に触れないように十分に下げた。

そして本研究では、ピン振幅の位置制御 (位置振幅制御, LC) を用いて計測を行い、混合刺激において、混合法の相違に基づいた感覚特性の変化を議論する。

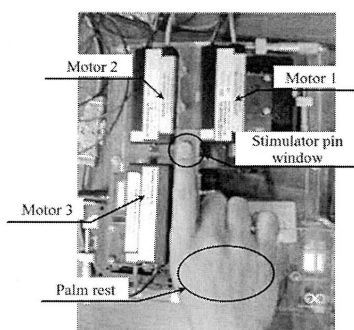


Fig. 1 Pin stimulator system with length and force control

4. 異なる混合振動刺激の生成方法

本研究で用いた生成方法は振幅変調を用いた2周波数の合成と、算術和を用いた2周波数の合成の2通りである。合成には前述の皮膚の受容器の振動特性から、250 Hz 成分と50 Hz 成分を用いた。振幅変調を用いた合成は250 Hz の搬送波上に50 Hz の信号波を走らせる形で2つの周波数成分を合成した。一方、算術和の合成は異なる周波数成分の sin 波を加算する形で2つの周波数成分を合成した。以下に両者の定義を示す。

* 振幅変調による合成

$$V_1 = (A_2 \cos(2\pi\omega_2 t) + A_1) \sin(2\pi\omega_1 t) \quad \dots (1)$$

A_1 : 搬送波振幅 (μm)

ω_1 : 搬送波周波数; 250 Hz

A_2 : 信号波振幅 (μm)

ω_2 : 信号波周波数; 50 Hz

* 算術和による合成

$$V_2 = A_3 \sin(2\pi\omega_3 t) + A_4 \sin(2\pi\omega_4 t) \quad \dots (2)$$

$\omega_3 = 250 \text{ Hz}$, $\kappa\omega_4 = 50 \text{ Hz}$

A_3, A_4 : 振幅 (μm)

また前述の TD2R の最大振幅値が $50\sim 60 \mu\text{m}$ であり、2つの周波数成分の振幅比をそろえるという観点から、250 Hz 成分、50 Hz 成分ともに今回は振幅値の上限を $30 \mu\text{m}$ と定めた。

図 2-1, 2-2 に各々の計測波形を示す。混合する波形成分は両者とも同様であるが、波形は混合手法によって大きく異なる。

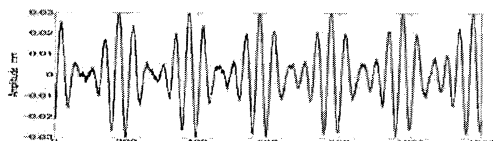


Fig. 2-1 Wave generated by amplitude modulation (250 Hz: $30 \mu\text{m}$, 50 Hz: $30 \mu\text{m}$)

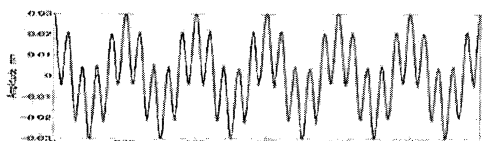


Fig. 2-2 Wave generated by arithmetical sum (250 Hz: $30 \mu\text{m}$, 50 Hz: $30 \mu\text{m}$)

5. 生成方法の異なる同成分の混合振動刺激の触覚判別調査

本章では、異なる方法で生成された同成分の混合振動刺激のヒトの触覚に与える効果を調査するために、まず両者の違いがヒトの指先で判別できるかを調査することとした。ここでは第3章で述べた刺激提示装置を用いて、右手示指末節に対して2通りの混合振動刺激の正弦波をランダムに提示した場合の判別能力の有無を調査する。用いた混合振動刺激は、振幅変調による250 Hz成分と50 Hz成分の混合振動刺激と、算術和による250 Hz成分と50 Hz成分の混合振動刺激の2通りであり、調査はランダムに提示した2つの刺激の相違を回答してもらう形で行った。

実験の詳細は、次の通りである。指の計測箇所は、図3に示すように、被験者の右手示指末節の先端から4分の1、指の幅方向については中央であり、ここをペンでマークする。ピン先端がその点に丁度接触するように、被験者自身が CCD カメラの映像を見ながら指先を刺激提示装置上に設置する。指がピンに接触する力は、5 g を目標とし、被験者が加重圧表示 (オシロスコープの表示) を見て実験中継続的に調整する。t

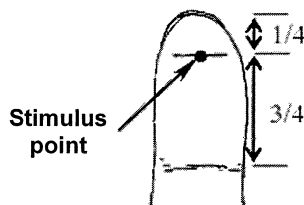


Fig. 3 Site of measurement

刺激提示手順は以下のとおりである。振幅変調による混合刺激をA、算術和による混合刺激をBとすると、A→B、A→A、B→A、B→Bの4パターンのうち1つがランダム順に提示される。各刺激は、1秒間ずつ提示され、その間に0.2秒間の無提示区間を配した。引き続き、1秒間の無提示区間の後、同じパターンの刺激の組み合わせがもう一度だけ提示した。被験者には提示された両刺激の触覚の相違を回答してもらう。混合振動刺激の両周波数成分の振幅値であるが、最初は振幅変調による合成、算術和による合成において共に250 Hz成分、50 Hz成分共に $30 \mu\text{m}$ で混合したものを提示した。(以下「50 Hz成分の振幅比1.0」) 続いて、250 Hz成分の振幅値をそのままに、50 Hz成分の振幅値を半分の $15 \mu\text{m}$ で混合したもの (以下「50 Hz成分の振幅比0.5」) で実験した。被験者は正常な触覚を有する学生7名 (男6名、女1名) であり30問ずつ、計60問を十分な時間間隔をおいて実施した。また2点識別法の棄却限界 (有意水準5%以下) が60問の出題のうち37問正解であるので、正解数37問以上を識別有意とした。

6. 結果及び考察

結果を図4に示す。まず「50 Hz成分の振幅比1.0」の結果であるが、7名の被験者のうち6名が37問以上正解し、大半の被験者において識別は有意となった。しかし識別有意でも正解数が比較的37に近い被験者が多く、判断は容易ではなかったと考えられる。

続いて「50 Hz成分の振幅比0.5」で同様の判別実験を行ってもらったが、こちらの場合は6名中1名のみが識別は有意となり、大多数の被験者は、判別不可能という結果になった。また「2通りの実験を通して、判別しやすかったか」という問いに、1. かなり容易 2. やや容易 3. ふつう 4. やや難しい 5. かなり難しい という選択肢の中から被験者に回答してもらったところ、どの被験者も4. やや難しい 5. かなり難しい のいずれかを選択していた。全被験者の平均は4.43となり、指先皮膚で感じられる触覚感としては、振幅変調による合成と算術和による合成の差はわずかであり、判別はかなり困難であることが分かる。

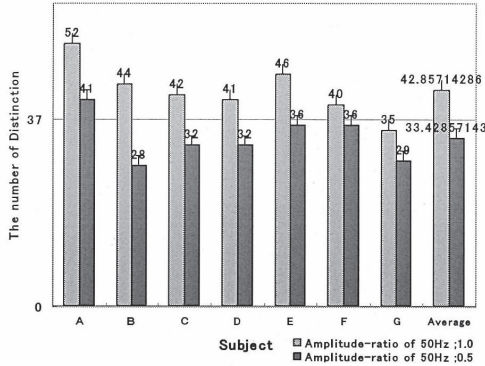


Fig. 4 Distinction between the amplitude modulation and the arithmetical sum.

7. 各混合振動刺激の感覚尺度の構成

本章では、2通りの混合振動刺激の各々の感覚レベル段階数を計測することにより、ピン提示条件における混合振動刺激の絶対閾と差閾を明らかにする。これにより、VRの触覚提示において振動刺激を効率的に利用するための知見を得る。

計測手続きは、前述の刺激提示装置を用い、ピンを指に接触する刺激位置、およびピンによる荷重は、第6章の実験と同条件である。

刺激提示手順を図5に示す。標準刺激（最初は単一250 Hz、振幅 $30\ \mu\text{m}$ ）と比較刺激（最初は単一250 Hz、振幅 $30\ \mu\text{m}$ ）が1秒間ずつ提示され、その間に0.2秒間の無提示区間を配し、これが繰り返される。被験者は、両刺激の感覚差が知覚できるようになるまで、比較刺激で50 Hz成分の振幅を増加させ、差が知覚できる最小の比較刺激を見出す操作を行う。必要ならば弁別閾付近で減少させて調整する。尚、最初の比較刺激は、標準刺激と同一とし、上昇系列を用いる。振幅の調整は、異なる変化幅（増加および減少）が割り当てられた複数の文字キーで行われ、最小の調整幅は $0.2\ \mu\text{m}$ とした。被験者は標準刺激と変化刺激を弁別可能と判断したら決定キーを押し、これにより、その比較刺激が次の標準刺激となる。この操作を繰り返すことにより、弁別閾の系列が得られる。

ここでは比較刺激で加えていく50 Hz成分の振幅値の上限を $30\ \mu\text{m}$ とし、そこまで得られた弁別閾の数を感覚レベル数と呼ぶこととする。

刺激は前章の実験と同様に、振動ピン先端の位置を振幅制御することにより提示し、ピンが指表面に接した状態で、実際に加えられた振幅を計測して、刺激強度振幅とした。

被験者は正常な触覚を有する学生7名（男6名、女1名）であり、振幅変調による合成、算術和による合成における感覚レベル測定を各3回、計6回の計測を、十分な時間間隔において実施した。

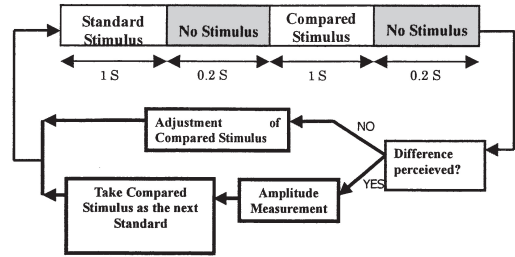


Fig. 5 Measurement procedure

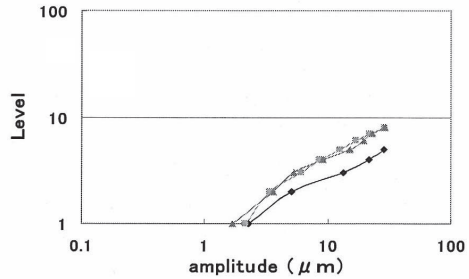


Fig. 6 Sensation intensity vs pin amplitude (Amplitude modulation, Data of Subject D)

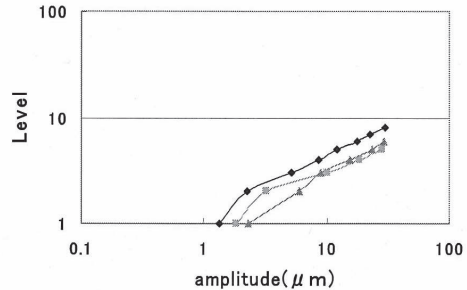


Fig. 7 Sensation intensity vs pin amplitude (Arithmetic sum, Data of Subject D)

8. 計測結果及び考察

典型的傾向を示した被験者Dの結果を図6に示す。2種類の生成方法による混合振動刺激に対する振幅と感覚レベルをそれぞれ両対数で表示した。3回の繰り返し計測における差閾に当たる値をすべて記入した。250 Hzは $30\ \mu\text{m}$ で固定であり、増加させた50 Hz成分の振幅値は $30\ \mu\text{m}$ までとした。複数の被験者から得られた感覚尺度曲線は、概略的に上に凸という形状で類似していた。図6、図7で示した被験者Dのデータは比較的ばらつきは

少なく、繰り返し性の良い結果であるが、算術和の合成においては、被験者Dではややばらつきが見られた。また、いずれの被験者でも、算術和の合成は、振幅変調による合成に比べて、データのばらつきが大きく、各被験者間での個人差が大きかった。また、全被験者において振幅値が大きくなるほど、各段階の差閾は大きくなった。

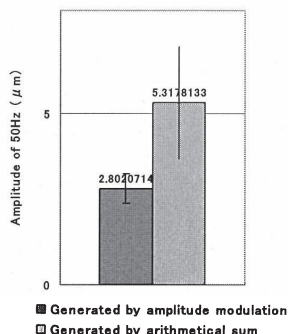


Fig. 8 Absolute threshold of 50 Hz (Mean of 5 subject. Error bar means SEM)

図8に各混合方法における50 Hz成分の絶対閾の被験者平均と標準誤差を示す。7名の被験者のうち5名の被験者が振幅変調による合成での閾値が算術和による合成よりも低いという結果になった。混合方法によって閾値に大きな差が観察された被験者もあった。また閾値の標準誤差は、振幅変調による合成では0.43、算術和による合成では1.63と、振幅変調のほうが低かった。分散分析の結果 $p=2.7 \times 10^{-6}$ となり、1%水準で有意となった。以上のことから、振幅変調による合成の場合、誤差が小さいので各被験者間の相違への最適化を行う必要がないという点で、触覚提示において好都合であると考えられる。また閾値も算術和による合成に比べて小さいので、触覚ディスプレイにおいて、より広域な触覚表現に適しているといえる。

図9に感覚レベル数を示す。これは2通りの合成方法において、50 Hz成分の振幅値が30 µmになるまでの間に各被験者が差異を判断し、得た感覚レベル数の被験者平均である。全ての被験者において、振幅変調による合成が算術和による合成に比べて感覚レベル数が多いという結果になった。両者の標準誤差は振幅変調による合成で、1.566、算術和による合成で1.383と、やや算術和による合成における標準誤差が低い、大きな差はない。また分散分析の結果 $p=6.05 \times 10^{-10}$ となり、1%水準で有意となった。被験者間の個人差は小さくないが、振幅変調による合成のほうが弁別可能なレベル数が多いので、感覚レベルの観点からもより広範囲の触覚提示が可能といえる。また、全実験の過程を通じ、多くの被験者が算術和による合成は全体的にやわらかい感じが

すると答えており、限定的な触覚提示に限れば、算術和による合成のほうが適している場合もあると考えられる。

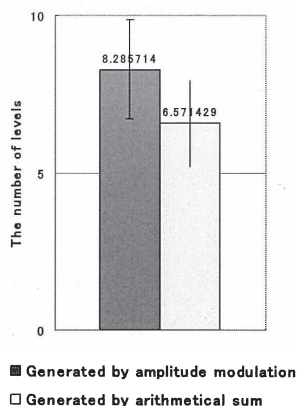


Fig. 9 The number of sensation levels at 30 µm amplitude of 50 Hz

9. 終わりに

本研究では、2つの周波数成分を含む振動刺激に関して、「振幅変調による合成」、「算術和による合成」の2つの生成方法の違いという観点に着目し、触覚的性質の違いを調査した。異なる生成方法の同成分の触覚刺激判別を行った結果、判別はかなり難度が高く、触覚的差異は見られなかった。両生成方法において250 Hzに50 Hz成分を増加させた場合の感覚段階の数と弁別閾を計測した結果、振幅変調を用いた合成が、被験者間の相違も少なく、より広範囲な触覚提示に適していることが示唆された。

参考文献

- [1] H. Oyama, Y. Ikei: Tactile Sensation Measurement for the Design of a Vibrotactile Display; ICAT2004, pp. 389-396 (2004).
- [2] Y. Ikei, M. Yamada, S. Fukuda: A new design of haptic texture display -TextureDisplay2- and its preliminary evaluation; IEEE-Virtual Reality 2001, pp. 21-28 (2001).
- [3] Y. Ikei, M. Shiratori: TextureExplorer: A tactile and force display for virtual textures; Haptic symposium, pp. 327-334 (2002).
- [4] Takaaki Nara, Yasuyuki Yanagida, Taro Maeda, and Susumu Tachi; A Tactile Display Using Elastic Waves TVRSJ, Vol. 3 No. 3 pp. 89-97, 1998
- [5] Takaaki Nara, Yasuyuki Yanagida, Taro Maeda, and Susumu Tachi; A Tactile Display Using Elastic Waves in a Tapered Membrane, TVRSJ, Vol. 4 No. 2 pp. 467-474, 1999