

触覚ディスプレイのための振動刺激合成に関する研究

加藤 秀^{*1} 梶谷 肇^{*2} 西村加南子^{*1} 池井 寧^{*1}

Vibratory stimulus synthesis for a tactile display

Suguru Kato^{*1}, Hajime Kajitani^{*2}, Kanako Nishimura^{*1} and Yasushi Ikei^{*1}

Abstract - This paper describes the characteristics of vibratory stimulus synthesis methods proposed for a haptic display. The methods mix two frequencies (250 and 50 Hz) on each pin by an amplitude modulation and an additive synthesis of sinusoidal waves. The mixture stimulations differed in sensation levels and hardness impression. The amplitude modulation produced the stimuli that were perceived with less difference about subjects and larger number of sensation levels. The additive synthesis generated softer impression than the amplitude modulation. The two mixture stimulations were compared where the amplitude of 50 Hz mixed was changed to investigate the sensitivity of the lower frequency for the methods. The result indicated that the stimuli of both 30 μm were discriminable, while less 50 Hz amplitude of 15 μm synthesis was not discriminable for the two mixture method. The result provided basic design parameters for a vibratory display.

Keywords : Vibratory pin stimulation, Synthesis methods, Difference threshold, Haptic texture

1. はじめに

本研究では、対象表面の材質や比較的小さな形状的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。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り、これを表現するには、触覚ディスプレイにおいて、多様な刺激を生成できる必要がある。

本論文では、振動の周波数に依存して触覚が異なることに着目し、2つの周波数を混合した合成刺激に関する特性を計測調査した結果について述べる。

2. 触覚と振動刺激

ヒトの手指を含む皮膚無毛部には、振動刺激を捉える機械的受容器としてマイスナー小体(MC)とパチニ小体(PC)がある。両受容器は神経分布密度および特性周波数が異なっている。MCおよびPCの神経分布密度は、指先で、それぞれ140 units/cm²および20 units/cm²程度、受容野は、MCでは直径2~3mmで境界が明確である。PCは皮下組織に存在し、受容野が大きく境界は明確でない^[1]。この特徴からは、MCによる刺激検出の方が、空間分解能が高いと予想される。一方、MCの特性周波数はおよそ50 Hz付近であり、その絶対閾は約2.66 μm 程度、PCは特性周波数およそ250 Hz、絶対閾は0.14 μm 程度である。従って、絶対閾についてはPCの方が小さく、低振幅の刺激まで使用することが可能である。本論文では、刺激に用いる周波数として、MCとPCの特性周波数付近である50 Hzおよび250 Hzを採用する。

3. 振動ピン配列型触覚ディスプレイ

本研究で対象とする振動ピン配列型触覚ディスプレイ(TextureDisplay2R)は、振動ピンが2mm間隔で5列10行の格子状に配置された触覚提示面を有している。ピンは積層型のピエゾアクチュエータにより駆動され、アクチュエータの変位を拡大共振機構で増大することにより、ピン先の振幅として最大約50 μm が得られている。振幅感度が高い受容器であるPCの特性から、振動周波数は250 Hzを中心に構成されているが、ある周波数範囲において振動刺激を提示することが可能となっている。

図1はシステムの構成であり、示指を触覚提示面上において、ディスプレイ全体を机上面内で2次元並進運動させることにより、なぞり運動を入力する。ディスプレイの相対位置は、マウスの移動量信号から求める。

FPGAを用いて50ピンのそれぞれに独立な振動周波数が設定可能である。周波数の範囲は、40~260 Hz、310~410 Hzであり、振動増幅機構系の共振周波数近傍となる270~300 Hzの領域が使用範囲から除去されている。各ピンへの駆動信号は、2値のPWM形式であり duty ratioで振幅を変化させている。^[2]

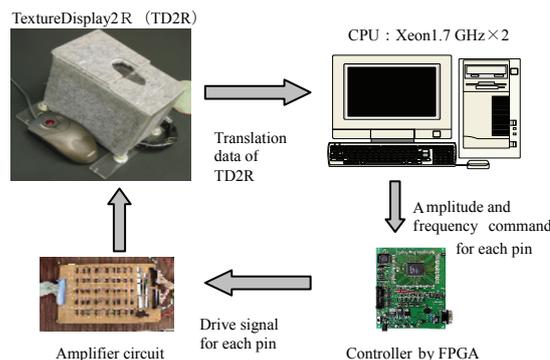


図1 TD2Rのシステム構成

Fig. 1 System configuration of TD2R.

*1: 首都大学東京
*2: 日本ユニシス株式会社
*1: Tokyo Metropolitan University
*2: Nihon Unisys.

4. 振動周波数の混合による触感覚の生成法

4.1 振動周波数の混合方法

本研究では、2周波数の混合方法として、振幅変調と加算合成を用いる。2つの周波数は、前述の皮膚の受容器の特性から、250 Hzと50 Hzである。振幅変調による合成では、搬送波が250 Hz、信号波が50 Hzである。

振幅変調による合成は次式で表される^[3]。

$$v_{am} = (v_s + v_{cm}) \sin(2\pi f_c t) \quad (1)$$

$$= \{ v_{sm} \cos(2\pi f_s t) + v_{cm} \} \sin(2\pi f_c t)$$

(v_c : 搬送波, v_{cm} : 振幅, f_c : 搬送波周波数
 v_s : 信号波, v_{sm} : 振幅, f_s : 信号波周波数)

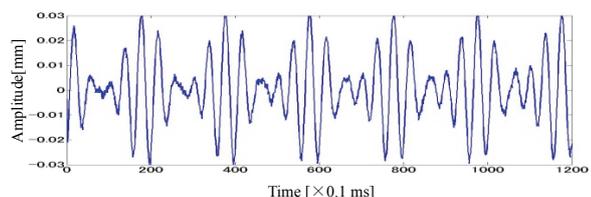
加算合成は、次式で表される。

$$v_{sum} = v_a \sin(2\pi f_a t) + v_b \sin(2\pi f_b t) \quad (2)$$

(v_a , v_b : 振幅, f_a , f_b : 周波数)

前述のようにTD2Rの最大振幅値は約50 μm であるが、適度な刺激量で2つの周波数成分を合成するため、250 Hz成分、50 Hz成分ともに、本章では、両振幅値の上限を30 μm とした。

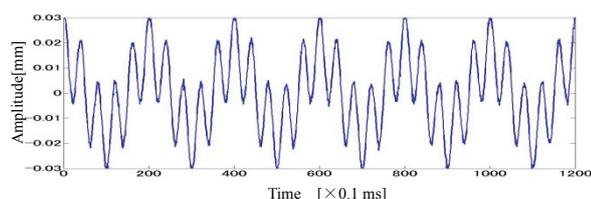
図2(A, B)に各々の計測波形を示す。混合する周波数の振幅は両者で等しいが、波形は混合手法によって大きく異なる。



A 振幅変調による合成波形

A Wave generated by amplitude modulation.

$V_{CM} = 30 \mu\text{m}$ (250 Hz), $V_{SM} = 30 \mu\text{m}$ (50 Hz)



B 加算合成波形

B Wave generated by arithmetical sum.

$V_A = 30 \mu\text{m}$ (250 Hz), $V_B = 30 \mu\text{m}$ (50 Hz)

図2 2つの手法による合成波形

Fig. 2 Waves generated by two methods.

4.2 周波数混合刺激の感覚尺度構成

250 Hzおよび50 Hzの単独周波数振動刺激に関しては、感覚尺度が既に構成されているので、ここでは、250 Hz一定振幅の刺激が存在する中で、50 Hzの振動刺激が与えられた際の感覚レベル数を計測することにより、特定の混合振動刺激の絶対閾と差閾を明らかにする。計測には、振動ピン刺激提示装置 (Aurora Scientific 社) を用い、ピン振幅を位置制御 (位置振幅制御) した。指の

計測箇所は、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る。該当箇所をペンでマークし、刺激位置を一定とする。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 (電圧の表示) を見て、実験中継続的に調整する。

刺激提示手順は、標準刺激 (最初は単一250 Hz、振幅30 μm) と比較刺激 (最初は単一250 Hz、振幅30 μm) 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、比較刺激において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。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 μm 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増加させる50 Hz成分の振幅値の上限を30 μm とし、そこまでに得られた弁別閾の数を感覚レベル数と呼ぶこととする。被験者は正常な触覚を有する学生8名 (男7名、女1名、平均年齢22.4歳) であり、振幅変調、および加算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。

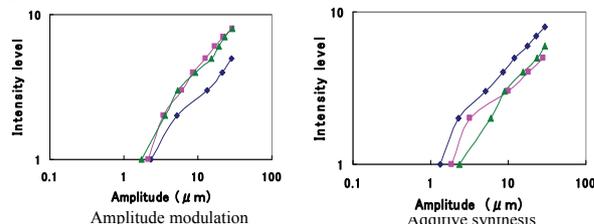


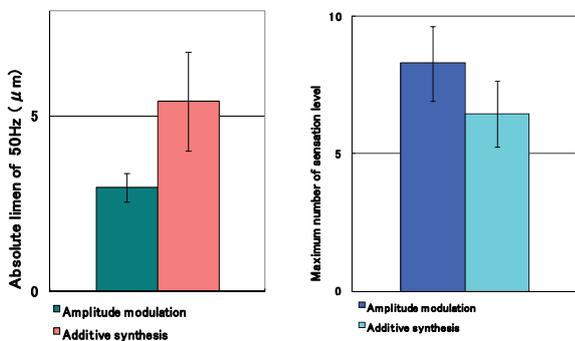
図3 差閾系列の代表的な結果 (被験者D)

Fig. 3 Sensation intensity vs. pin-amplitude. (data of Subject D)

典型的傾向を示した被験者Dの結果を図3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 μm で固定であり、増加させた50 Hz成分の振幅値は30 μm 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3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、加算合成においては、被験者Dではややばらつきが見られた。また、全被験者において、加算合成は、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。

図4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。8名の被験者のうち6名の被験者が振幅変調による合成での閾値が加算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0.41, 加算合成では1.41と、振幅変調のほうが低かった。分散分析の結果 $p=7.03 \times 10^{-6}$ 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は、閾値が加算合成に比べて小さいため、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。また、被験者間の差が小さく、個別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ましい特性を有すると考えられる。

図5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加算合成に比べて感覚レベル数が多いという結果になった。両者の標準誤差に大きな差はない。また分散分析の結果 $p=3.41 \times 10^{-9}$ 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。



(Mean of 7 subject. Error bar means SEM)
図4 50 Hz成分の絶対閾 Fig. 4 Absolute threshold of 50 Hz.
図5 50 Hz成分の最大感覚強度 Fig. 5 Peak sensation level of 50 Hz.

4.3 周波数混合刺激の触覚評価

前節の調査過程において、多くの被験者が加算合成は全体的にやわらかい感覚であると回答しており、限定的な範囲の触覚提示では、加算合成が適する場合もあると考えられる。そこで、振幅変調合成、加算合成によりもたらされる硬さに関する触覚印象について調査した。刺激提示手順は、標準刺激（単一 250 Hz, 振幅 30 μm ）と比較刺激（全 8 種のうち 1 つがランダムに提示、詳細は以下）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 2 回繰り返される。被験者には、標準刺激を基準とした際の比較刺激の触覚印象について、

図6に示す主観評価尺度で記入を依頼した^[4]。被験者は、前節と同じ7人である。

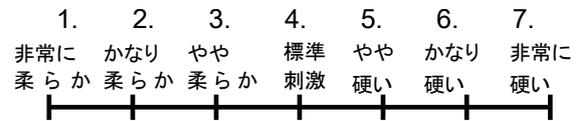


図6 主観評価尺度
Fig. 6 Subjective scale.

調査対象とした比較刺激は、以下の8つである。

- ・振幅変調による合成 4 種
A : 250 Hz 成分 (30 μm) と 50 Hz 成分 (7.5 μm)
B : 250 Hz 成分 (30 μm) と 50 Hz 成分 (15 μm)
C : 250 Hz 成分 (30 μm) と 50 Hz 成分 (22.5 μm)
D : 250 Hz 成分 (30 μm) と 50 Hz 成分 (30 μm)
- ・加算合成 4 種
E : 250 Hz 成分 (30 μm) と 50 Hz 成分 (7.5 μm)
F : 250 Hz 成分 (30 μm) と 50 Hz 成分 (15 μm)
G : 250 Hz 成分 (30 μm) と 50 Hz 成分 (22.5 μm)
H : 250 Hz 成分 (30 μm) と 50 Hz 成分 (30 μm)

図7に触覚印象調査の結果を示す。グラフの縦軸は、図7の主観評価尺度の平均値である。振幅変調による合成の4種(A~D)では、50 Hz成分の混合率が少ない時は、標準刺激よりやや硬いという印象であった。50 Hz成分が増加するに従い、加算合成の4種(E~H)に比べ、硬い印象が顕著に増加した。これに対して、加算合成4種(E~H)では、50 Hz成分の混合率を増加させても硬さ印象の上昇は少ない。またEに関しては、標準刺激よりも柔らかい印象となるという結果を得た。更に、数人の被験者の評定として、加算合成では50 Hz成分の混合率を増加させると、次第にゴムのような弾力のある質感が増加するという興味深い観察結果が提示された。

振幅変調による合成(A~D)の方が、加算合成(E~H)よりも硬さの印象の増加率が大きいことは、図5の感覚レベル数の傾向とも整合している。

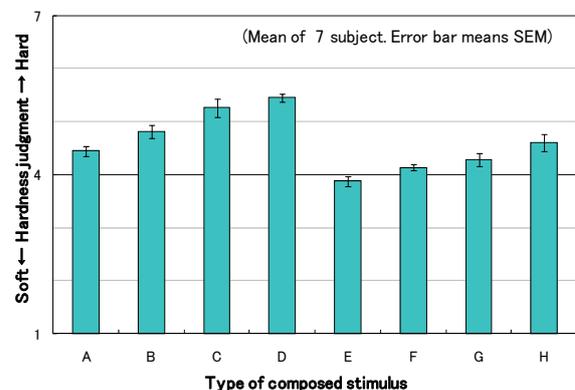


図7 8種類の合成刺激の硬さ評定結果
Fig. 7 Hardness ratings of eight synthesized stimuli.

4.4 周波数混合刺激の弁別特性

2つの方法で生成された周波数混合刺激による触覚の効果を調査するため、両者の相違を被験者に判別してもらった。ここでは、4-2節で述べた刺激提示装置を用いて、右手手指末節に対して周波数混合刺激をランダムな順に提示した場合の判別力の有無を調べた。使用した周波数混合刺激は、250 Hz成分と50 Hz成分の振幅変調によるものと、加算合成によるものの2通りであり、提示された2つの刺激の相違の有無を回答してもらった。

ピンを指に接触する刺激位置、およびピンによる荷重は、4-2節の実験と同条件である。

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、加算合成の混合刺激を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、同じパターンをもう一回だけ提示した。被験者は、提示された両刺激の触覚の相違を回答した。

混合刺激の振幅値は、2通り用意した。最初は振幅変調、加算合成共に250 Hz成分、50 Hz成分が同じ30 μmで混合されたものを提示した。(50 Hz成分の振幅比1.0条件)次に、250 Hz成分が同じ30 μmで、50 Hz成分を半分の15 μmで混合したもの(50 Hz成分の振幅比0.5条件)を提示した。被験者は正常な触覚を有する学生8名(男7名、女1名、平均年齢22.4歳)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%)より、正解数37問以上を識別有意とした。識別の結果を図8に示す。

50 Hz成分の振幅比1.0条件での結果は、8名の被験者のうち7名が37問以上正解で、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。

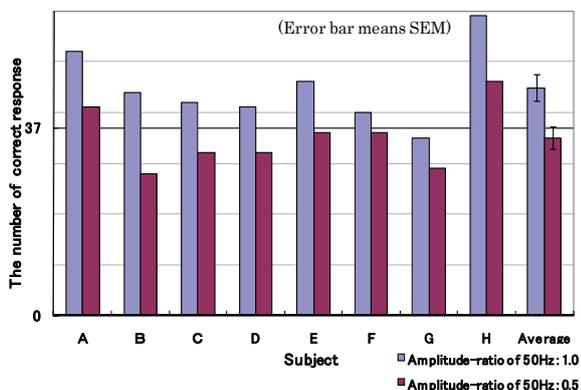


図8 2つの生成法による混合刺激の弁別特性
Fig. 8 Discrimination characteristics of mixture stimulation by two generation methods.

更に50 Hz成分の振幅比0.5条件では、8名中2名だけが識別は有意となり、他の被験者は、判別不可能という結果になった。また質問紙評価で、判別の難易度を5段階尺度(1.かなり容易, 2.やや容易, 3.中程度, 4.やや難しい, 5.かなり難しい)で評定してもらったところ、全被験者が4または5のいずれかを選択し、平均は4.43となった。従って、これらの条件での振幅変調による合成と加算合成の触覚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。

5. おわりに

複数の周波数の混合による触覚合成手法に関して、感覚尺度構成、触覚印象調査、弁別実験を行い、限定的だが加算合成と振幅変調による合成の触覚的特性を明らかにすることができた。具体的な結論を以下にまとめる。

- ① 感覚尺度構成において、振幅変調による合成が被験者間の相違が小さく、弁別可能数が多いという点で触覚提示に好適である。
- ② 触覚印象調査において、①より振幅変調合成が有用と考えられるが、加算合成も用途によっては有効であり、振幅変調による合成では生成が困難な、やわらかい触覚印象を生成可能である。
- ③ 合成刺激の弁別において、振幅変調による合成と加算合成における250 Hz (30 μm) と50 Hz (30 μm)を合成した際の弁別は5%水準で有意となった。しかし250 Hz (30 μm) と50 Hz (15 μm)と成分を変えた際の弁別は有意ではなかった。以上により、振幅変調と加算合成による刺激の特徴について、限定的だが定量的な結果が得られた。

6. 参考文献

- [1] 岩村 良晃: ヒト感覚受容器の構造と特性, 日本ロボット学会誌, Vol. 2, No. 5, pp. 54-60, (1984).
- [2] 山田真理子: 触覚テクスチャディスプレイ2の設計, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 11, No. 1, pp. 1-4, (2006).
- [3] F.R.コナー/原著, 高原幹夫/訳: 変調入門, 森北書房,(1985).
- [4] 田中 良久: 心理学的測定法, 東京大学出版会, (1977)