

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21700185

研究課題名（和文） 触覚ヘテロダイナ法に基づく時間周波数刺激の強調提示

研究課題名（英文） Vibro-tactile Stimulation Based on Haptic Heterodyne Method

研究代表者

牧野 泰才（MAKINO YASUTOSHI）

慶應義塾大学・システムデザイン・マネジメント研究科・特任講師

研究者番号：00518714

研究成果の概要（和文）：本研究では、主に2つの成果を出した。1つは、振幅変調された高周波振動に対する人の知覚特性を明らかにしたことである。皮膚が線形弾性体として働いていても、触覚受容器に半波整流のような非線形性があることを示した。もう1つは、それを応用した触感提示手法を提案したことである。2つの振動子から異なる周波数の高周波振動を同時に皮膚に与えることで、皮膚上で振動を加算し、振幅変調振動（ビート振動）を知覚させられることを示した。

研究成果の概要（英文）：In this research, we mainly show 2 research outcomes. One is that we revealed a tactual perceptual characteristic to an amplitude-modulated (AM) high frequency vibration. Our result shows that there must be some sort of non-linearity such as a half-wave rectification at the tactile mechanoreceptor. We proposed a tactile display which takes advantage of the characteristic as our second outcome. The method gives vibratory sensation to a user with two vibrators from different positions. The beat frequency of the two vibrators can be perceived provided a user touches both of them.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2009年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 2010年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 2011年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 2012年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学、知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：触覚情報処理、マン・マシンインタフェース、バーチャルリアリティ

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、人が知覚できない程度の高周波の振幅変調振動を利用した触感の提示が提案されていた。この知覚現象の興味深い点は、キャリア周波数単体では知覚できない程度の高周波振動であっても、振幅変調をす

ることにより知覚可能になるという点である。このことは、皮膚の変形や受容器の感度特性を線形システムと考えると理解できないものである。何らかの非線形性を考慮する必要がある。この非線形性は、振動体の変形に対して、皮膚が追従できず、線形弾性体と

して機能していないことにより生じると理解されていた。

一方当時、徐々に触覚受容器の知覚特性が明らかになってきていた。皮膚表面の局所的なせん断変形や、あるいは吸引によっても、知覚としては押されたように感じられるという知見や、神経発火と皮膚変形モデルとの対応関係から、少なくとも1つの受容器は、応力ではなく、ひずみエネルギーに感度を持つということが示唆され始めていた。

2. 研究の目的

本研究は、大きく分けて2つの目的に基づいている。1つは、高周波の振幅変調振動に対する、人の触覚受容器の生理学的な知覚特性の解明である。もう1つは、その特性を利用した、工学的応用の検討である。これ以降、それぞれを「生理学的解明」「工学的応用の検討」として言及することとする。

(1) 生理学的解明

前節で述べたように、研究開始当初、触覚受容器の知覚する物理量が明らかになりつつあった。もし本当に、振動を知覚する受容器が皮膚変形の二乗に比例した物理量（ひずみエネルギー）に感度を持つならば、皮膚表面の非線形な変形を仮定しなくても、振幅変調振動の包絡を検出できる可能性がある。これは、通信においてはヘテロダイン検波として知られる手法の原理に近い。この関連性に気づき、人が知覚できない高周波振動の振幅変調に対する知覚特性を詳細に検討し、その仕組みを明らかにすることを本研究の1つめの目的とした。

なお、本研究の成果により、振動知覚においては皮膚変形の二乗に比例した物理量を検出しては“いない”ことを確かめた。

(2) 工学的応用の検討

一方、この知覚特性が明らかになれば、これを利用した工学的な応用が見込まれる。例えば、知覚できない程度の高周波で振動している対象に対して、その振動周波数と異なる近接した周波数で指を振動させることで、本来不可知な振動を検知可能になる。本研究では、高周波の振幅変調振動の知覚特性を工学的に応用する手法の検討を2つめの目的とした。

3. 研究の方法

(1) 基本原理

本研究の基本原理解は以下のとおりである。皮膚表面に以下のような異なる2つの周波数の振動が与えられたとする。

$$d = \cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t \quad (1)$$

この式は、三角関数の和積の公式を利用すると以下のように書き直せる。

$$d = \cos \alpha t \cdot \cos \beta t \quad (2)$$

ただし $\alpha = (\omega_1 - \omega_2)/2$, $\beta = (\omega_1 + \omega_2)/2$

である。これは、キャリア周波数 β の振動の振幅が、周波数 α で変動している（ビート振動）と考えることができる。例えば $\omega_1 = 1.2\text{kHz}$, $\omega_2 = 1.3\text{kHz}$ とする。人の知覚できる周波数帯域は高々 1kHz 程度であるため、どちらの振動も単体では人が知覚できない。しかし、上記のような加算が行われると、その振幅が周波数 $\alpha = 50\text{Hz}$ で振動することになり、このとき人はこの振動を知覚できる。

(2) 生理学的解明

我々の予想は、受容器の受容特性に非線形性があり、皮膚が線形弾性体として動いている条件下においても、この知覚特性は生じるというものであった。また、先行知見から、その非線形性は皮膚変形の二乗に感度を持つというものであろうと考えた。

そこでまず、人が知覚できない振動帯域の中で、比較的低い周波数である 1.2kHz 程度における皮膚変形の計測を行った。超音波などの高周波帯域に比べ、皮膚が振動周波数に追従しやすく、皮膚変形の非線形性が生じにくいと考えたためである。図1に示すように2つの振動子の皮膚表面の変形をレーザ変位計により計測した。

また、この装置を利用し、異なる2つの周波数ペアを提示した際に、どのペアの時に振動覚が生じるかを心理物理実験により検証した。10名の被験者に対して、ある刺激パターンを知覚するか否かを二択で回答させた。

本実験において興味深かったのは、2つの周波数が2倍の関係の時、すなわち、 ω_1 が 1.2kHz 、 ω_2 が 2.4kHz のようなときに、振動が知覚されなくなるという発見であった。これについての詳細は次節に記述する。

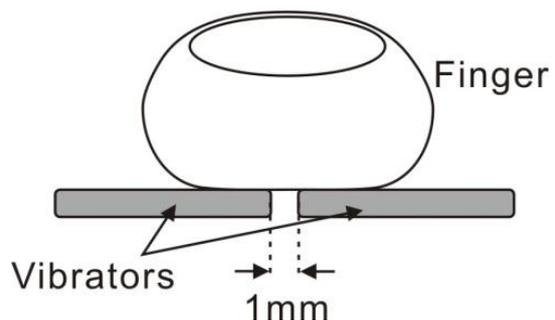


図1 振幅変調振動提示装置。振動子の隙間から皮膚表面の変形をレーザ変位計で計測

(3) 工学的応用の検討

図2に示すような“二重振動刺激”という手法を提案した。これは、振動子を2つ用意し、1つを手持ちのモバイル端末に、もう1つを爪に貼付するという方法である。2つの振動子を知覚できない程度の、異なる高周波振動のペアで駆動すると、両者が接触した時にもみ振動が加算され振幅変調が生じ、感覚

が得られる。通常、タッチパネルを指で触った場合、携帯端末が振動することにより、保持している手の側に触覚が生じる。本手法では、主に接触部位において振動の加算が生じ、結果として振幅変調振動が生成されることで、保持している手や、あるいは振動子が貼付された爪には触覚は生じず、接触部にのみ選択的に刺激を提示できるという特長を持つ。心理物理実験により、実際に本手法で接触部位に振動感覚が生じることを確認した。

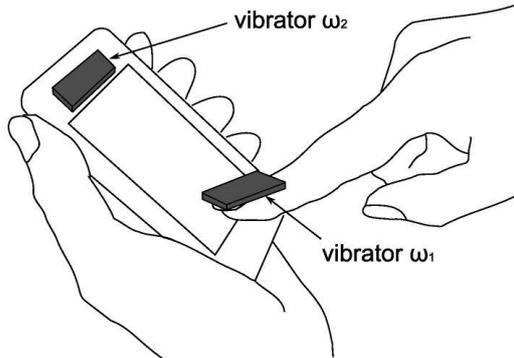


図2 二重振動刺激による触覚提示

4. 研究成果

(1) 生理学的解明

皮膚表面の変形を計測するために、 $\omega_1=1.2\text{kHz}$ 、 $\omega_2=1.3\text{kHz}$ の2つの周波数振動を与えた際の変形を実際にレーザ変位計により計測した。得られた振動波形を、周波数解析した結果を図3に示す。図より明らかに、与えた周波数成分の振動のみが検出されていることが確認された。皮膚自体が非線形な挙動を示すという従来の解釈においては、変調周波数である50Hz付近に振動のピークが見られるはずである。それが見られないということにより、皮膚自体は線形弾性体としての挙動を示しているということが示された。これは、従来知られていなかった知見である。

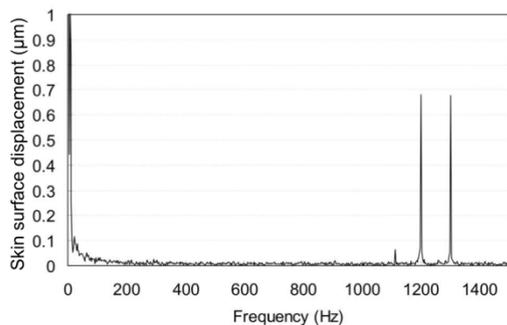


図3 皮膚表面変位の周波数解析結果

この条件下で振幅変調された振動が知覚されるか否かを確認した心理物理実験結果を図4に示す。縦軸が知覚された割合を示す。

3つの条件は、2つの振動子から与えた周波数の組み合わせである。明らかに、2つの周波数が異なる場合においてのみ、振動感覚が生じていることが分かる。統計的解析においても $p < 0.01$ で有意であることが確認されている。すなわち、皮膚自体が線形弾性体として動いている条件下でも、振幅変調振動が知覚されるということが示された。

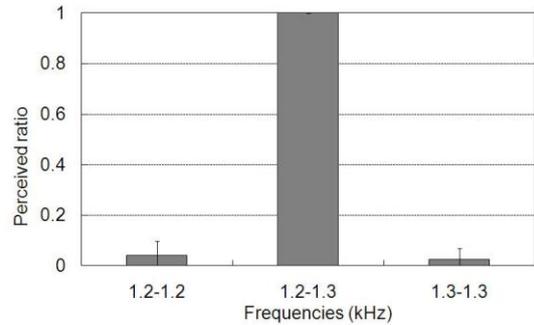


図4 高周波振動のペアに対する知覚の有無

このとき、果たして当初の予想通り二乗の演算がなされているかどうかについては、図5の実験結果により否定された。図5は、

$$\omega_2 = 2\omega_1 + \delta\omega \quad \textcircled{3}$$

という条件下においての同様の知覚の有無を調べる実験である。この図より明らかに、 $\delta\omega = 0$ の条件下において振動が知覚されなくなることが確認された。詳細な考察は省くが、二乗の演算の場合には、このような特異的な知覚閾値の変動は説明できない。よって、振動を知覚する受容器の検出する物理量として、二乗の演算が行われて“いない”可能性を示すことができた。

なお、実験において知覚された振動パターンを図示したのが図6である。この図より包絡に含まれる低周波成分が検出されていると推測できる。これを検出可能なのは、例えば、半波整流のような非線形な特性があるのではないかということが示唆された。これについては、今後より詳細な検証が必要である。

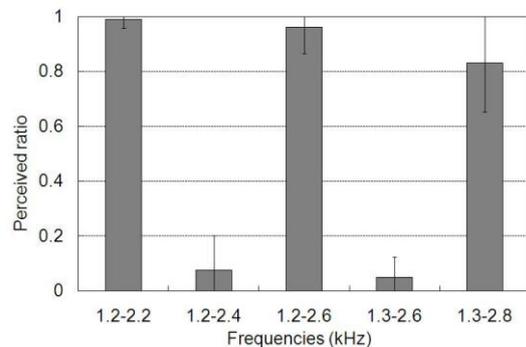


図5 2倍の周波数ペアにおける知覚の有無

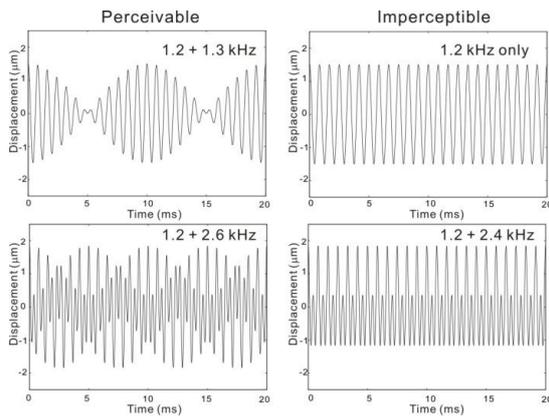


図6 知覚された振動波形

(2) 工学的応用：二重振動刺激

我々が本研究で提案したのは、図2に示す二重振動刺激という手法である。本手法は、2つの振動子が貼付された部位（図2の場合は操作指とタッチパネルデバイス）が接触した時にのみ、両者の振動の加算が生じ、感覚が生起されるという特長を持つ。実際にこのような知覚特性が生じるかどうかを、心理物理実験により検証した。

図7はそれぞれ単体で振動を与えた場合と、両方同時に振動を与えた場合とで知覚がどのように変わるかを調べた結果である。想定通り、両者が振動した時にのみ知覚が生じることが確認された。

またこのときに、どの部位において振動感覚が生じるかを、既存の手法と比較した。詳細は省くが、本提案手法のみが、指とタッチパネルとの接触面において振動が知覚されるという結果となった。これら実験結果より、二重振動刺激の基本的な原理が実現可能なことを示した。

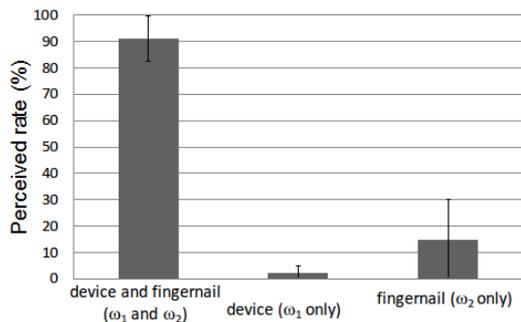


図7 二重振動刺激の知覚特性

(3) 工学的応用：手の甲を利用した情報入力インタフェース

二重振動刺激は、2つの振動子が接触した場合においてのみ感覚が生じる。従って、人の皮膚をインタフェースとして利用するような場合に、皮膚同士の境界面に触感を提示

できる可能性がある。なお、一般的な振動子を利用した場合には、振動の伝播経路自体が皮膚であることから、接触部にのみ触感を生じさせるのは困難である。このような、提案手法の利点を利用することを念頭に、人の皮膚を利用した、新しい情報入力インタフェースの開発も行った。

図8に開発した手の甲を利用したインタフェースを示す。手の甲をパソコンのタッチパッドのようにして利用できるデバイスである。赤外線のリフレクタを腕時計型デバイスに搭載し、手の甲上の指先の位置を推定する。これにより、手の甲のどのあたりに触れたかという接触情報が、自分自身の手の甲の皮膚感覚としてフィードバックされるため、タッチパネルデバイスなどで難しいブラインドタッチなどを、やりやすくなるのではないかと考えている。

なお、本研究に関しては、中妻啓氏（現熊本大学助教）と共同で行った成果である。



図8 手の甲を利用した情報入力インタフェース

(4) その他の成果

本研究では、上記の他にもいくつか興味深い成果が得られており、国内の学会において発表した。

- ① 振幅変調ではなく、高周波の“周波数”変調(FM)振動においても、同様の知覚が生じるということを発見した。人の知覚が生じない程度の高周波で周波数変調をかけた場合においても、振動知覚が生じる。この場合、振幅はほぼ一定であることから、振幅変調の時の包絡を検出しているという理解では説明しきれない。これに関しては今後さらなる調査が必要であると考える。
- ② 皮膚の部位ごとの感度の違いと、皮膚の共振特性との間の関係性を明らかにした。振動に対する人の皮膚の知覚特性は、主に指先で調べられており、それ以外の部位が同じ知覚の傾向があるのか、もし違う場合には、それは何に起因するのかと

いった点は、あまり議論されていなかった。今回、皮膚表面の変位計測が可能な装置を作成したことにより、指先と手の平とでの振動の様子の違いを実際に計測することが出来た。この共振特性の違いが、部位ごとの周波数感度に影響することを示し、有限要素モデルなどを用いて検証を行った。本件も、今後更なる検証を重ね、事実を明らかにすることが重要と考えている。

- ③ 手の甲のインタフェースにおいて、二重振動刺激による触感提示を試みたものの、振動の伝搬特性が悪く、期待するような結果は得られなかった。そこで、前腕部を対象として二重振動刺激が実現可能であるかどうかを確認する研究を行った。これに関しては、現状のセットアップでは、実用的なレベルの知覚は得られなかったが、原理的には、モバイル端末によって得られた実験結果と同様に、接触部位にのみ触感を生起させられるという結果を得ることが出来た。今後は皮膚の弾性的特性などを考慮し、適切な条件などを検討し、その可能性を探っていくことが重要であると考えている。
- ④ 指先に与える振動の質についても検討を行った。実際の振動を直接スピーカで再生し、それを触る場合、スピーカ自体は垂直方向に動いているにもかかわらず、指の下を水平方向に物体が移動している感覚が得られることを発見した。これは、適切な条件さえ揃えば、指の下に二次元的な圧力分布を必要としないことを示す結果である。二重振動刺激においても適切な条件で刺激を提示出来れば、多様な表現を実現可能であることを示す結果を示した。

受賞：

優秀講演賞：第 12 回計測自動制御学会 SI 部門講演会：“垂直方向振動を用いた水平方向移動感の呈示”（2011）

日本バーチャルリアリティ学会学術奨励賞
受賞：“二重振動刺激によるモバイルタッチパネル機器への触感提示”（2010）

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 1 件）

- ① 牧野泰才，前野隆司：“手の甲の皮膚感覚を利用した情報入力インタフェース，”日本ロボット学会誌，Vol. 30 No. 5，p. 488-490，2012（査読なし，解説記事）

〔学会発表〕（計 15 件）

- ① Y. Makino，T. Maeno：“Paired Vibratory Stimulation for Haptic Feedback，” Proceedings of the 4th Augmented Human International Conference，pp. 47-50，Augmented Human 2013，2013. 3. 14，Stuttgart，Germany（査読あり）
- ② 牧野泰才，西尾未希，前野隆司：“指先の振動モードと周波数感度特性の関係解明，”計測自動制御学会 SI 部門講演会，1D3-2，2012. 12. 18，福岡。
- ③ 牧野泰才，前野隆司：“高周波振動の振幅変調刺激における変調周波数感度特性，”ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012，1A1-A03，2012. 5. 28，浜松。
- ④ 牧野泰才，前野隆司：“垂直方向振動を用いた水平方向移動感の呈示，”計測自動制御学会 SI 部門講演会 2011，1I4-3，2011. 12. 24，京都。
- ⑤ 西尾未希，牧野泰才，前野隆司：“ヒトの振動知覚に及ぼす皮膚の共振周波数の影響，”計測自動制御学会 SI 部門講演会 2011，1I3-5，2011. 12. 24，京都。
- ⑥ 牧野泰才：“振幅変調振動の知覚とその工学的応用，”日本基礎心理学会サテライトワークショップ（招待講演）2011. 12. 2，横浜。
- ⑦ K. Nakatsuma，H. Shinoda，Y. Makino，K. Sato，and T. Maeno：“Touch Interface on Back of the Hand，” SIGGRAPH 2011，Emerging Technology，2011. 8. 7-11，Vancouver，Canada（査読あり）
- ⑧ Y. Makino，T. Maeno，and H. Shinoda：“Perceptual Characteristic of Multi-Spectral Vibrations beyond the Human Perceivable Frequency Range，” World Haptics 2011，pp. 439-443，2011. 6. 24，Istanbul，Turkey（査読あり）
- ⑨ 西尾未希，牧野泰才，前野隆司：“皮膚の共振特性が振動感度に及ぼす影響の調査，”ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011，2P1-013，2011. 5. 28，岡山。
- ⑩ 牧野泰才，西尾未希，前野隆司，周波数変調振動の知覚特性—第 2 報—皮膚の弾性的性質の影響評価，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，2C2-2，2010. 12. 24，仙台。
- ⑪ 西尾未希，牧野泰才，前野隆司，振動周波数感度における手指の弾性的特性の影響，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，2C2-3，2010. 12. 24，仙台。
- ⑫ 牧野泰才，佐伯政男，前野隆司，二重振動刺激によるモバイルタッチパネル機器への触感提示，第 15 回日本バーチャルリアリティ学会，3D4-5，2010. 9. 17，金沢。

- ⑬ Y. Makino, M. Saeki, T. Maeno:
“Tactile Feedback for Handheld Touch Panel Device with Dual Vibratory Stimulus,” Proc. Asian Conference on Design and Digital Engineering, DE-6-5, 2010. 8. 26, Jeju, Korea.
- ⑭ 田代郁, 牧野泰才, 前野隆司, 周波数変調振動の知覚特性, 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, 1C1-3, 2009. 12. 24, 東京
- ⑮ 牧野泰才, 篠田裕之: “受容器の非線形受容特性を利用した触感提示法,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009, 2A2-J14, 2009. 5. 24, 福岡.

[図書] (計1件)

- ① 牧野泰才, 中妻啓 他 “次世代ヒューマンインタフェース開発最前線,” 3編4章4節, エヌ・ティー・エス, 2013

[その他]

デモによる発表

- ① 牧野泰才: 機械学会主催「触覚技術の基礎と応用」—ヒトの触覚理解からヒューマンマシンインタフェースやロボットへの応用まで— にてデモ 2012. 7. 20, 名古屋.
- ② Y. Makino, and T. Maeno “Dual Vibratory Stimulation for Mobile Devices,” World Haptics 2012, 2012. 6. 22, Istanbul, Turkey. (デモセッション)
- ③ K. Nakatsuma, Y. Makino, T. Maeno, and H. Shinoda: “Wristband-shaped Input Interface Using User’s Back of Hand,” World Haptics 2012, 2012. 6. 22, Istanbul, Turkey. (デモセッション)
- ④ 牧野泰才: 基礎心理学会にて, デモ展示, 2011年12月3, 4日, 横浜.
- ⑤ 牧野泰才: 機械学会主催「触覚技術の基礎と応用」—ヒトの触覚理解からヒューマンマシンインタフェースやロボットへの応用まで— にてデモ 2011. 10. 28, 東京.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

牧野 泰才 (MAKINO YASUTOSHI)

慶應義塾大学・システムデザイン・マネジメント研究科・特任講師

研究者番号: 00518714

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし