

受容器の非線形受容特性を利用した触感提示法

Tactile Display Using Non-linear Property of Mechanoreceptors

○准 牧野 泰才 (慶應義塾大学), 正 篠田 裕之 (東京大学)

Yasutoshi MAKINO, Keio University, makino@sdm.keio.ac.jp

Hiroyuki SHINODA, The University of Tokyo, shino@alab.t.u-tokyo.ac.jp

In this paper, we precisely investigate a method for giving a tactile sensation with a combination of imperceptible vibrations. When the two frequencies such as 1.2 and 1.3 kHz (both of them are beyond the perceivable range) are applied to skin surface, we feel vibration. This characteristic has been mainly considered due to the effect of non-linear skin elastic property, however, we observed that the skin surface only moves at the input frequencies (1.2, 1.3 kHz) but it does not move at modulated frequency (50 Hz). We also found another remarkable characteristic that a harmonic frequencies pair, such as 1.2 and 2.4 kHz, lessened sensitivity. When we assume that the mechanoreceptor detects low frequency envelope of a given signal, the perceptual characteristics are well explained.

Key Words: Tactile envelope detection, Tactile display

1. はじめに

触感の生成方法として、AM 変調された超音波により振動感覚を提示できることが知られている[1][2]。この知覚特性は、主に皮膚の非線形性によりその変形が超音波の振動周波数に追従しきれず、変調周波数で振動するためと考えられている。それに対し本稿では、「触覚受容器自体の非線形性」により、知覚閾外の振動を用いて触感を提示可能なことを示す。この触覚受容器自体の非線形特性については、神経発火のメカニズム等に基づき[3]でその可能性が言及されている。本稿では皮膚表面の変形を観察することで、その可能性が高いことを示す。

触覚の感度は、高々1kHz 程度までであることが知られている。1kHz 以上の振動成分に関しては知覚されない。それでは例えば、超音波ほど高周波ではなく、触覚の帯域よりも少し高い1.2kHz と1.3kHz の振動を同時に皮膚に印加した場合何が起こるだろうか？この振動は

$$\begin{aligned} \cos(2\pi * 1200 * t) + \cos(2\pi * 1300 * t) \\ = 2 \cos(2\pi * 50 * t) \cos(2\pi * 1250 * t) \end{aligned} \quad (1)$$

であるから、搬送周波数 1.25kHz、変調周波数 50Hz の AM 変調波である。

皮膚が線形弾性体であり、触覚受容器が表面変位に対して線形な物理量に感度を持つのであれば、感度を持たない振動成分の線形和である(1)の波形は、知覚されることは無いはずである。しかし後述の実験結果で示すように、この振動は知覚することができる。

この現象に対するこれまでの解釈は、「皮膚の非線形性により皮膚表面が変調周波数で振動しているため」というものであった。しかし、今回用いたような低周波な振動を印加した場合には、皮膚はその振動成分に追従していることが観察された。すなわち、変調周波数では振動していなかった。これは従来の解釈ではこの知覚特性を説明できないことを意味する。

図1に1.2, 1.3 kHz の2周波数を印加した際の、皮膚表面

振動のスペクトルを示す。図2に示す実験系の2つの振動子の隙間から、レーザ変位計を用い皮膚表面の変位を測定した。グラフより、印加した1.2, 1.3 kHzにおいて高いピークが観測される一方、変調周波数(50Hz)では皮膚が振動していないことが観測された。この結果は、「皮膚が線形弾性体として働いていても、人間は振動の包絡成分を検出している」ということを意味する。これはすなわち、触覚受容器自体が皮膚表面の変位に対して非線形な物理量に感度を持っていることを示唆するものである。

本稿では数種類の振動を加えた際の知覚特性から、触覚受容器自体が持つ非線形特性を考察する。このような新しい受容特性を利用した触覚ディスプレイの可能性を示し、その特長を述べる。

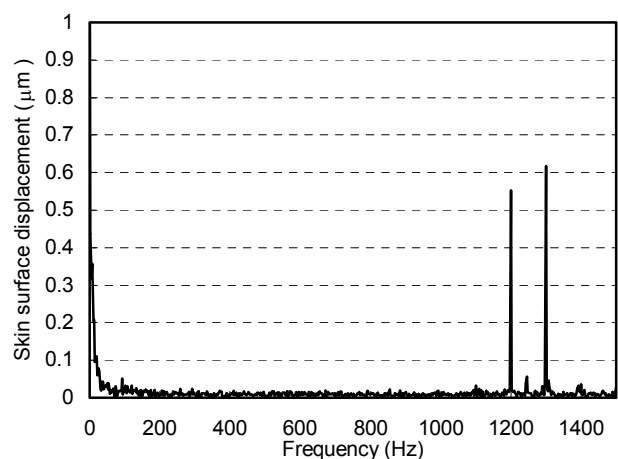


Fig.1 Skin surface deformation with AM-modulated vibration. Only the input frequencies (1200 and 1300 Hz) are observed. The modulated frequency (50 Hz) is not detected.

2. 心理物理実験

2.1 概要

どのような振動刺激を知覚し、どのような刺激は感じられないのかを検証するため、心理物理実験を行った。図2に実験系を示す。被験者は机の上に設置された2つの振動子の境界に指を置く。2つの振動子の周波数及び振幅は独立に変えることが出来る。2つの振動子の周波数を変化させることで、知覚特性がどのように変化するかを調べた。

被験者は10名(男性7名、女性3名)であり、以下の2つの実験いずれにおいても、振動刺激を感じたか否かを「YES」「NO」で回答した。ヘッドホンによりホワイトノイズを提示し、音情報を遮断した状態で実験を行った。

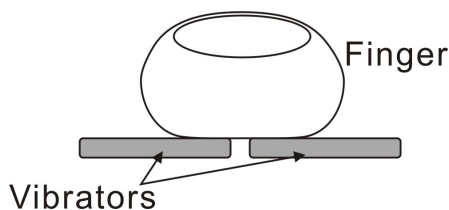


Fig.2 Experimental settings. Subjects put their finger on the border of the vibrators whose frequencies were independently controlled.

2.2 実験1 隣接2周波数のみで知覚されることの確認

まず1つめの実験として、「知覚閾外の単一の周波数刺激では知覚されず、隣接する2周波数によりAM変調がかかっているときのみ知覚される」という事実を確認するための実験を行った。1.2-1.2 kHz, 1.2-1.3 kHz, 1.3-1.3 kHz の3種類の刺激を用意し、各刺激をランダムに20回被験者に提示した。振動子の振幅は、いずれの刺激も1.5 μm 程度で行った。1人の被験者の皮膚変形を観察し、図1に示すように、この振幅においては変調周波数の振動成分が生じていないことを確認した。

結果を図3に示す。縦軸は「YES」と回答した割合の10人の被験者の平均値を示し、エラーバーはその分散を表す。図より明らかに、単一周波数のときに刺激は知覚されず、異なる2つの周波数を印加したときにのみ刺激が知覚されることが分かった。

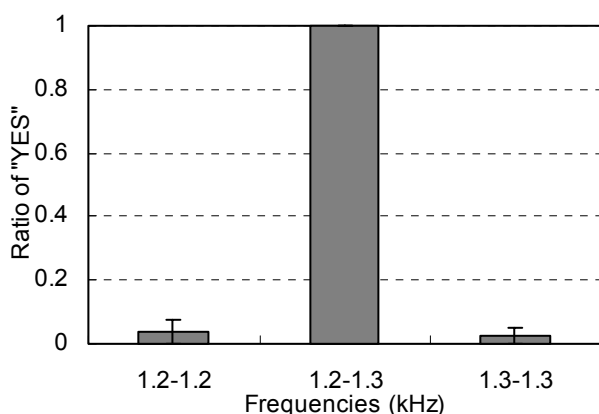


Fig. 3. Experimental result 1. The vertical axis indicates the perceived ratio and their error bars show the variances. It is clear that the vibratory sensation is perceived only when the two different frequencies were applied to the subject.

2.2 実験2 倍周波数ペアのとき知覚されないことの確認

2つめの実験は、予備実験での発見に基づいている。それは、「2つの周波数のペアが倍周波数の場合、振動が知覚されない」というものである。倍の周波数の場合には知覚されないが、そこから前後に少し離れた周波数の場合は、十分知覚される。このことを確認するため、1.2-2.2 kHz, 1.2-2.4 kHz, 1.2-2.6 kHz, 1.3-2.6 kHz, 1.3-2.8 kHz の5種類の刺激を用意した。この中で倍周波数の関係となるのは、1.2-2.4 kHzと1.3-2.6 kHzの2つである。このときの振動子の振幅は、低周波側の1.2, 1.3 kHzで2.2 μm 、高周波側の2.2, 2.4, 2.6 kHzで1.5 μm 程度で行った。

図4に結果を示す。縦軸は「YES」と回答した割合の10人の被験者の平均値を示し、エラーバーはその分散を表す。予備実験での知見の通り、倍周波数のペアの場合にはほとんど知覚されず、そこから200 Hz離れた振動のペアの時には十分知覚されることが分かった。

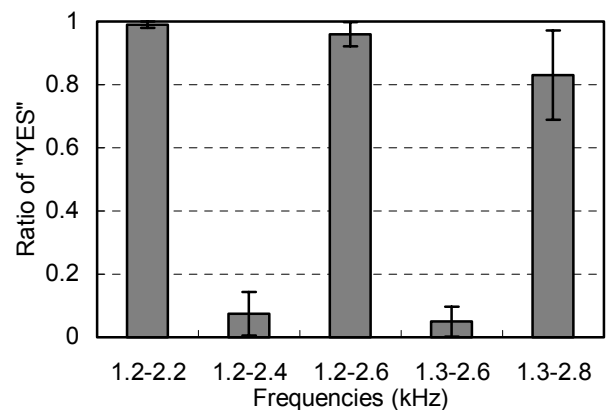


Fig. 4. Experimental result 2. The vertical axis indicates the perceived ratio and their error bars show the variances. It is clear that the harmonic pairs lessen the sensitivity.

3. 考察

図5に今回の心理物理実験で知覚された振動波形(左)、及び知覚されなかった振動波形(右)の例をそれぞれ示す。図より明らかのように、低周波の包絡成分が含まれる振動は知覚され、低周波の包絡が無い振動は知覚されないということが分かる。

図6に今回我々が提案する人間の触知覚モデルを示す。人間の触知覚には、大きく3つフィルタ効果が存在すると考えている。1つめは皮膚の特性によるフィルタ効果である。低周波においては線形弾性体として働き、高周波になると非線形な挙動を見せる。従来知られている超音波によるAM変調波の知覚は、この非線形なフィルタによるものと理解できる。しかし今回用いた程度の低周波の振動に関しては、皮膚は線形弾性体として振動に追従するため、このフィルタは線形領域で働くと考えられる。この場合、2つめのフィルタを考えないと心理物理実験で得られた知覚特性を説明できない。

2つめが本稿で提案する触覚受容器自体の持つ非線形特性である。心理物理実験の結果から、包絡検出のような非線形特性を持つものと考えられるが、正確にどのような特性と決定することは困難である。実験結果より言えるのは、「2乗の物理量に感度を持つ場合に生じるような、ヘテロダイク検波ではない」ということである。それは2倍の高調波成分と

のペアのときに感度が下がるという実験2の結果から結論付けられる。ヘテロダイン検波の場合には、差の周波数のみが意味を持つため、2倍のときにのみ感度が下がる理由が説明できない。

3つめのフィルタは、包絡検出後の波形に対してかかるフィルタである。図5の右側に示す「知覚されなかった波形」から考えると、このフィルタは直流成分、及び1 kHz以上の振動成分をカットするようなバンドパスフィルタになっていると考えられる。これはすなわち、各受容器の周波数特性を与えるフィルタと一致する。単一周波数の刺激を与えた場合には振動に包絡成分が生じないため、2つめの包絡検出フィルタは作用しない。その結果、この3つめのフィルタの特性がそのまま受容器の周波数特性として観察されるものと考えられる。

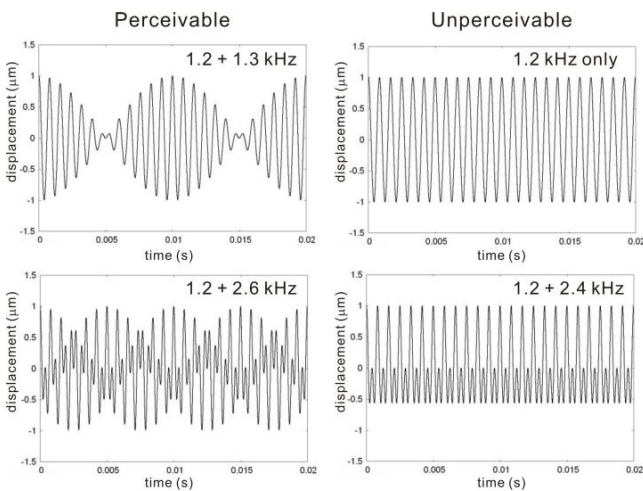


Fig. 5 Examples of perceivable/imperceptible vibrations. The waves having low frequency envelopes can be felt.

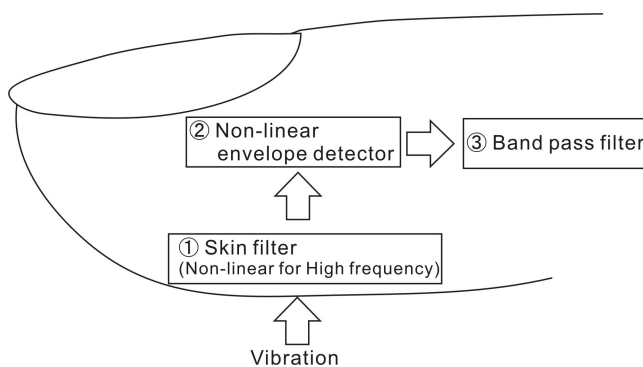


Fig. 6 Three filters model. The second “Non-linear envelope detector” is our main discovery in this paper.

4. アプリケーション

本稿で提案する触感提示法は、触覚受容器の特性解明という面において非常に有用であるが、これを用いることで以下のようなアプリケーションが考えられる。

1) 携帯ペン入力デバイスへの触感提示

小型携帯デバイスへの触感提示は触覚ディスプレイの課題の1つである。ここでは特にペン入力デバイスに触感を提

示する方法を考える。最も単純な方法はデバイス側を振動させる場合である。しかしこのときには、支えている手の側にも振動が生じてしまい、ペンにのみ触感を提示することは出来ない。逆にペンを振動させる場合には、ペン側が位置情報を知っている必要があり、デバイスとペンを接続しなければならない。

本稿で提案する手法は、ペン自体が位置情報を検出することなく、ペンにのみ振動感覚を生じさせることを可能とする。例えばペンを1 kHz、デバイスを1.1 kHzで振動させる場合を考える。ペンとデバイスが接触していない場合には、どちらも不可知な帯域の振動であるから、触感は生じない。ペンがデバイスに接触したときにのみ、AM変調された振動が生じることで触感が生じる。ここで、ペン側・デバイス側の振動強度を適切に設定することで、ペン側にのみ刺激を提示することが可能となる。ペン側は常に振動した状態で、デバイス側の振動のON/OFFを位置に応じて切り替えれば、両者を接続することなく、位置に応じた触感の提示が可能になる。指輪型の振動体を用いれば、ペンではなく指先に振動感覚を提示することも可能になる。

2) 手による振動の探索

本手法では、人間が検出できる周波数帯域を実質的に広げることができる。例えば指先に3 kHzで振動する振動子を配置した場合には、3 kHz ± 300 Hz程度の振動成分に対する感度が高くなる。これまで感じることの出来なかった振動を検出できるため、素手による振動源の探索などが可能になる。例えば現在超音波により実現されているような、乳がんの腫瘍の発見などが、振動体と素手により実現できる可能性もある。

5. まとめ

本稿では、人間の触覚閾よりも高い周波数の振動を組み合わせることで触感が提示できるという手法を詳細に検証した。従来の解釈は、皮膚の非線形性により変調周波数で皮膚が振動しているために知覚されるというものであった。それに対し本稿では、皮膚表面の変位を観察し、変調周波数での振動が生じていない場合でも知覚が得られることを示した。これは、触覚受容器自体が皮膚表面の変位に対して非線形な物理量に感度を持つことを示す結果であり、触覚受容器の特性を解明する上で重要な発見である。さまざまな振動刺激を印加し、知覚される振動と知覚されない振動とを比べることで、触覚受容器が包絡線を検出している可能性を示した。本手法は触覚受容器の特性の解明としても重要であるが、これを用いることで特長的なアプリケーションの実現も期待される。それらの例を示し、可能性を検討した。

文献

[1] T. Nara, T. Maeda, Y. Yanagida, and S. Tachi: “Tactile Display Using Elastic Waves”, Proceedings of IEEE Virtual Reality Annual International Symposium, 1998, pp. 43-50.
 [2] 昆陽雅司, 音川佳代, 前野隆司, 超音波振動の振幅変調を用いた複合触覚呈示法, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'05講演論文集, IP1-N-101, 2005.
 [3] P. J. J. Lamore, H. Muijser, C. J. Keemink: “Envelope detection of amplitude-modulated high-frequency sinusoidal signals by skin mechanoreceptors” J. Acoust. Soc. Am. Volume 79, Issue 4, pp. 1082-1085.