

電気触覚ディスプレイにおける受容器選択刺激の心理物理的評価

東京大学 ○梶本裕之, 川上直樹, 館暲

Psychophysical evaluation of receptor selective stimulation in electro-tactile display

○Hiroyuki KAJIMOTO, Naoki KAWAKAMI and Susumu TACHI, The University of Tokyo

Abstract: We have proposed to selectively stimulate each types of mechanoreceptors inside skin by using electrical current from surface electrodes. Our goal is to produce natural tactile sensation by combining them. In this paper we show the psychophysical evidence that the selective stimulation of Meissner corpuscle was achieved. We also found that the selective stimulation of Pacinian corpuscle was not attained by the electrical stimulation, which results in unnatural vibratory sensation. We propose to use mechanical vibration in combination with electrical stimulation to selectively stimulate Pacinian corpuscle.

1. 電気触覚と受容器選択刺激

人間の皮膚下には4種類の機械受容器が存在し、皮膚変形情報を神経活動パルスに変換している。もし各種受容器を種類別に刺激できれば、その刺激を感覚の基底として扱い、合成操作により任意の触覚を生成可能と考えられる。

本稿は機械受容器のうち振動感覚を司る二つの受容器、マイスナー小体とパチニ小体の選択刺激を扱う。刺激手法は皮膚表面からの電流パルスによる神経活動の誘発である。我々は過去の研究において、これらの受容器の空間的な配置の違いを利用して選択刺激可能であることを見出した[1]。同心円電極を用いた電気刺激の場合、中心電極と不関（外周）電極の距離を狭めると電流が浅部にのみ到達し、浅部受容器選択刺激が実現する。特にマイスナー小体は中心電極を陽極としたパルスで刺激されやすい(Fig 1)。これをマイスナーモードと呼ぶ。逆に電極間隔を広げると電流は深部にまで到達し、深部に存在するパチニ小体も刺激可能となる。これをパチニモードと呼ぶ。

各モードで生じる感覚は、確かに定性的には目的の受容器の活動時に生じる感覚として説明できるものであった。しかし選択刺激の定量的な検証はこれまでなされていない。本稿は心理物理実験を用いることにより二種類の振動感覚受容器の選択刺激を検証する試みである。

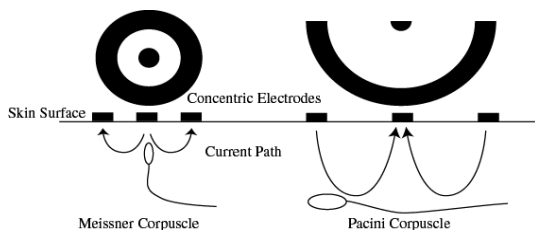


Fig 1 Selective stimulation. (left) Meissner mode. Positive pulse is applied from central part of small concentric electrodes. (right) Pacinian mode. Negative pulse from central electrode reaches to deeper tissue.

2. 実験

2.1. システム構成

Fig 2は電気刺激と機械刺激（上下振動）を同時に同一場所に対して行うことができる刺激装置である。スピーカに取り付けた電極（ステンレス製、直径1.0[mm]）により皮膚を電気

的、機械的に刺激する。スピーカ基部と電極間の距離はフォトリフレクタにより計測可能である。

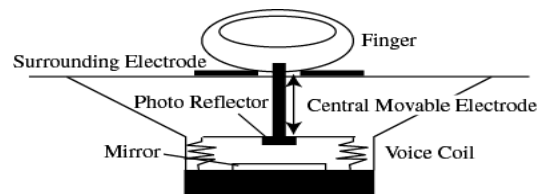


Fig 2 Mechanical and electrical stimulator. Central electrode is mounted on the voice coil. Vibration amplitude is observed by the photo reflector attached on the coil.

2.2. 機械的サイン波に対する周波数弁別実験

まず機械的なサイン波に対する周波数弁別能力を極限法により測定した。被験者は人差指の腹で電極に触れ、電極を振幅0.1[mm]で振動させる。標準刺激、及び周波数の異なる比較刺激をそれぞれ1秒ずつ、1秒の休みを挟んで提示し、周波数の高低を二件法で解答させる。比較刺激の周波数は標準刺激の0.5倍、または2.0倍から開始し、正しい解答を続ける限り徐々に標準刺激に近づけていく。初めて解答を間違えた場所を周波数弁別閾値とする。4名（25~35歳男性3名女性1名）の被験者に対し周波数15, 30, 60, 120[Hz]で上下閾値を5回ずつ取得した。典型例として一名の結果をFig 3に示す。図の横軸が標準刺激の周波数、縦軸は比較刺激周波数の標準刺激に対する比である。閾値が1.0に近いほど弁別能力が高いことを示している。全ての周波数において±20%程度の周波数弁別能力を示している事がわかる。

2.3. マイスナーモードにおける周波数弁別実験

次に前述のマイスナーモードで電気刺激を行い、刺激パルス周波数に対して同様の弁別実験を行った。過去の知見[2]として、機械的サイン波に対して受容器はその周波数で発火することが知られている。逆に電気刺激によって受容器に接続する神経を刺激すれば、そのパルス周波数の振動と知覚され、機械振動と同等の弁別能力を示すと期待される。中心電極直径1.0[mm]、不関電極内周6.0[mm]の電極を用い、陽極パルス刺激を行った。標準刺激のパルス周波数は15, 30, 45, 60, 120[Hz]、パルス電流値2.4[mA]、パルス幅0.2[ms]とした。結果をFig 4に示す。

15, 30[Hz]においては機械刺激と同等の周波数弁別能力を示したが、45[Hz]から上側弁別閾が急激に2に近い値を示した。これは45[Hz]と90[Hz]のパルスを周波数的に区別出来ないことを意味する。

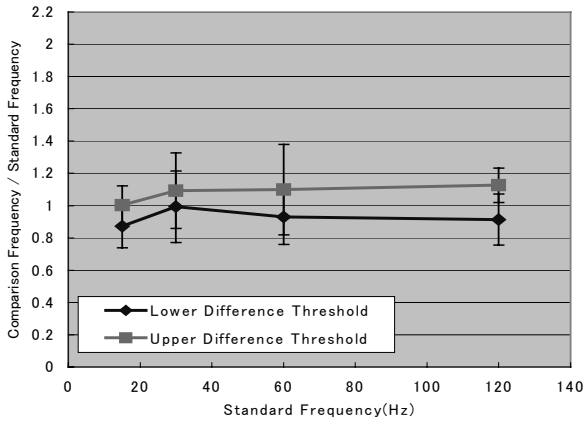


Fig 3 Upper and lower difference thresholds of vibratory frequency, obtained by the method of limits. Mechanical sine wave with 0.1[mm] amplitude was applied on the finger-pad.

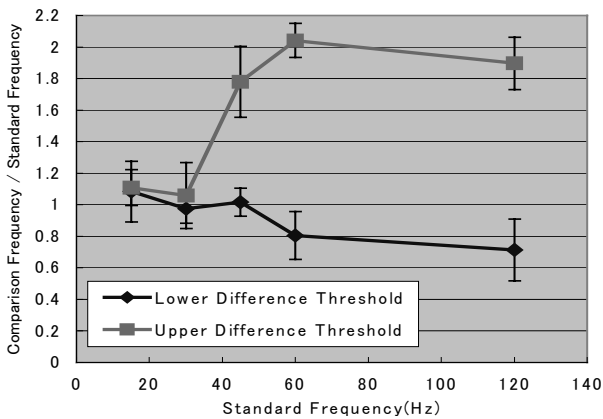


Fig 4 Upper and lower difference thresholds of electrical stimulation. Positive pulse with 2.4[mA], 0.2[ms] was applied on the finger-pad through the concentric electrode with 1.0[mm] and 6.0[mm] inner and outer diameter.

この結果はマイスナー小体を選択的に刺激しているためと考えられる。15, 30[Hz]は機械刺激ではマイスナー小体のみが活動する領域であり[2], 今回の電気刺激がマイスナー小体を刺激しているために機械刺激と同等の弁別能力を示したと考えられる。これに対して70[Hz]付近からは本来機械刺激であればパチニ小体も活動を始め、マイスナー小体との活動の比率が振動知覚の手がかりとなる領域である。しかしマイスナーモードではパチニ小体が活動していないものと推測される。すると脳はマイスナー小体が100[Hz]近くで発火しているにも関わらずパチニ小体が発火しないという矛盾した刺激系列を受け、振動周波数知覚に間違いを生じたものと解釈される。

2.4. 深部刺激による検証

この考察が正しいとすれば、深部刺激によってパチニ小体をも刺激すれば周波数弁別能力は向上するはずである。前述のように深部刺激は電極間隔を広げれば実現できる。中心電

極直径 3.0[mm], 不閉電極内周 10.0[mm]の電極を用い、陰極パルス刺激によって弁別実験を行った。結果をFig 5に示す。高周波部の弁別能力が機械刺激と同程度にまで高まり、予想を裏付ける結果となった。

しかし同時に120[Hz]での上側弁別閾が2に近い値を示した。これは120[Hz]と240[Hz]のパルスを区別できないことを意味する。この結果も機械刺激との状況比較によって説明できる。本来機械的な刺激であれば200[Hz]以上はパチニ小体のみ活動する領域である[2]。しかし電気的な深部刺激では指に存在する神経全てを刺激してしまうため、結果としてマイスナー小体に繋がる神経も活動してしまう。すると脳はマイスナー小体とパチニ小体が共に活動する周波数領域であると判断し、周波数知覚に間違いを生じたものと解釈される。

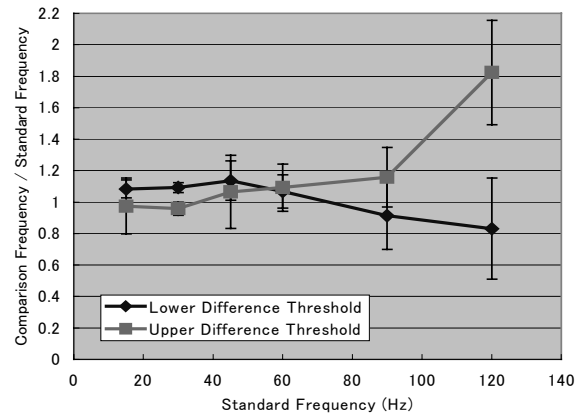


Fig 5 Upper and lower difference thresholds of deeper part electrical stimulation. Negative pulse with 2.4[mA], 0.2[ms] was applied on the finger-pad by the large concentric electrode with 3.0[mm] and 10.0[mm] inner and outer diameter.

3. まとめ

本稿では周波数弁別実験により電気刺激におけるマイスナー小体選択刺激を検証した。同時に経皮電気刺激の限界、すなわち深部に存在するパチニ小体「のみ」を選択刺激できないために、200[Hz]以上の周波数の振動感覚を提示出来ないことが明らかとなった。しかし逆に機械的な刺激によってパチニ小体のみを刺激することは難しくない。パチニ小体の共振周波数は他とかけ離れており、振幅閾値は他に比べるかに低いからである。同時に受容野は広いため高密度提示の必要は無い。今後はパチニ小体の選択刺激は機械的刺激に任せ、電気刺激は高密度実装可能という利点を生かして皮膚浅部受容器の刺激に専念する、という使い分けが有効と思われる。

謝辞 本研究の一部は文部省科研費補助金(特別研究員奨励費 13-06135)によっている。

参考文献

- [1] 梶本裕之, 川上直樹, 前田太郎, 舘暲: 皮膚感覚神経を選択的に刺激する電気触覚ディスプレイ: 電子情報通信学会誌, pp.120-128, vol.j84-D-II, no.1, Jan, 2001.
- [2] A. B. Vallbo and R. S. Johansson, "Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation," Human Neurobiology, vol.3, pp.3-14 Springer-Verlag 1984.

