

低周波振動刺激を用いた圧覚ディスプレイの開発 — 振動子形状の影響の評価 —

Development of a Pressure Display Using Low Frequency Vibratory Stimulation — Evaluations of Shape Effects of Vibrators —

学 横田 求 (東北大) 正 昆陽 雅司 (東北大) 正 前野 隆司 (慶應大) 正 田所 諭 (東北大)

Motomu YOKOTA, Tohoku University
Masashi KONYO, Tohoku University
Takashi MAENO, Keio University
Satoshi TADOKORO, Tohoku University

Abstract— We found that vibratory stimuli at very low frequency can generate static pressure sensation without vibratory feeling. This phenomenon is very useful for realizing cutaneous pressure display by the ultrasonic vibrator. In this paper, shape effects of vibrator were evaluated by calculating tactile receptor activities based on contact analysis with several shape of vibrators using a finite element model of human finger.

Key Words: Tactile Display, Pressure Sensation, Tactile Receptors, Finite Element Model

1. はじめに

本研究の目的は、振動という比較の実装が容易な機械刺激によって、振動せずに静的に圧迫される感覚（静的圧覚）を呈示するディスプレイを開発することである。これにより、従来の圧覚ディスプレイ装置に対し、飛躍的にシンプルな機構で圧覚を呈示することが可能になる。筆者らは、ヒトの触覚受容器の周波数応答特性の差異を利用して、5 Hz 程度の振動刺激を用いて、振動感覚を生成する FA I（マイスナー小体）を活動させずに、圧覚を生成する SA I（メルケル小体）のみを活動させることによって静的圧覚を呈示する手法を提案している。これまでに、ヒト指腹部に平板に押し付けて加振した際に静的圧覚が生成する条件を、心理物理実験および有限要素モデルを用いたシミュレーションによって確認した¹⁾。

本稿では、指腹部に接触させる振動子の形状を工夫することにより、より効率的に SA I を刺激することが可能かをシミュレーションによって検討する。

2. ピンマトリクス型超音波振動子

本研究で想定する振動刺激呈示デバイスとして、筆者らが提案しているピンマトリクス型超音波振動子²⁾を取り上げる。図 1 にその外観を示す。このデバイスはピンマトリクス型の振動子の底面にピエゾ素子を接着したもので、

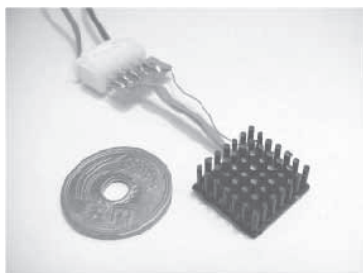


Fig.1 A pin-matrix type ultrasonic vibrator²⁾.

ピエゾ素子を共振点で駆動することによって、ピン先端部に分布的な超音波振動分布を生成することが可能である。このとき、超音波振動を振幅変調することによって、ヒトの知覚可能な領域で任意の周波数成分刺激を生成することが可能である。

以下、この振動子のピンの直径と間隔が SA I と FA I の活動に与える影響を解析し、最適な振動子形状を検討する。

3. 有限要素解析による触覚受容器活動の推定

ヒト指腹部の有限要素解析によって皮膚の変形に伴うひずみエネルギーを求めることによって、触覚受容器の活動を推定することが可能である。小林ら³⁾はヒト指腹部断面の指紋構造、乳突起を含む、表皮・真皮・皮下組織の層構造とそれらの縦弾性係数の測定などを行い、指腹部の有限要素モデルを構築した。本研究では、このモデルに対し、指紋の稜線形状をヒトの指紋形状の力学的意味に基づき修正し、表層部に角質層を加えて改良した有限要素モデル⁴⁾を用いる(図 2)。

なお、触覚受容器の活動を判定するために、Freeman の振動検出振幅閾値⁵⁾をもとにひずみエネルギー閾値を求めた結果¹⁾を用いる。

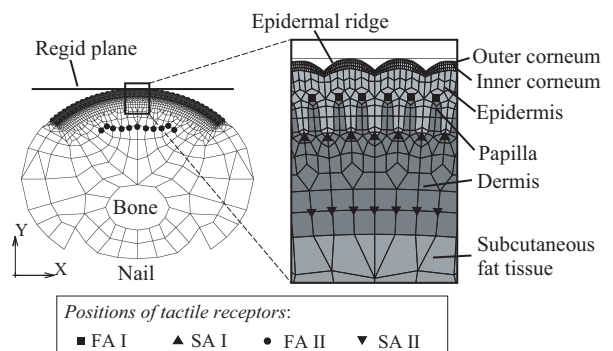


Fig.2 Improved finite element model of a finger section and location of tactile receptors.

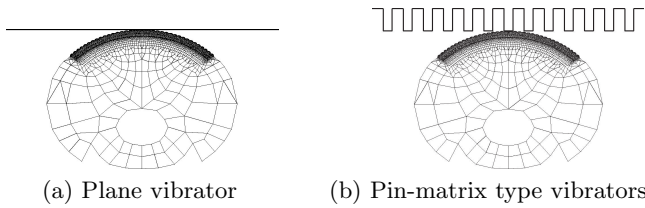


Fig.3 Contact analysis with the different shape of vibrators

4. 解析

4.1 方法

前節で述べた人指腹部断面の有限要素モデルを用いる。このモデルに対し、図3のように、剛体平板および円柱状のピンをマトリクス状に配置したものを押し当て、振動を加えた際の動的解析を行い、各触覚受容器配置位置におけるひずみエネルギーを求める。

振動子はシグモイド関数を用いて 1.0 mm だけ滑らかに押し込み、0.5 秒間停止する。その後、除荷する方向から余弦波を用いて 5 Hz で振動を加える。解析は有限要素コード MSC.Marc2005 を用い、時間ステップは 1 msec、解析時間は 5 秒間とした。

なお、振動刺激に対するひずみエネルギーは変動するため、本節では、ひずみエネルギー E をひずみエネルギーの変動振幅と定義した。このひずみエネルギー E は、振動を加え始めてから十分時間が経過した時刻 4 秒から 5 秒の間の変動成分の最大値と最小値の差によって求めることとする。また、触覚受容器の活動量を推定するためにひずみエネルギーの同調閾値 (FA I : $8.9 \text{ [J/m}^3\text{]}$, SA I : $7.5 \text{ [J/m}^3\text{]}$) を超えた分のひずみエネルギーを FA I, SA I 別に積算した指標を用いる。

4.2 ピン直径・ピン間隔の影響

振動子のピン直径 R とピン間隔 D の影響を比較する。まず、ピン直径の影響について以下の条件で解析する。

- ピン直径 R : 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 (mm)
- ピン間隔 D : 1.0 (mm)

また、ピン間隔の影響について以下の条件で解析する。

- ピン直径 R : 0.8 (mm)
- ピン間隔 D : 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 (mm)

図4に(a)平板と(b)ピンマトリクス型剛体を押し込んだ際の同時刻のひずみエネルギー分布の例を示す。平板は接触面端部にひずみエネルギーが集中するのにに対し、ピンマトリクス型では指腹部中心部にもメルケル小体位置でひずみエネルギーが増加することが分かる。

図5に、ピン直径を変えた際の SA I と FA I の活動量の違いを示す。SA I, FA I とともに、直径が細いほど振動振幅に対する活動増加量が增大することが分かる。また、図6にピン間隔を変えた際の活動量の違いを示す。この結果より、ピン間隔の影響はピン直径よりも受容器活動に対する影響が大きいことが分かる。ただし、単純にピン間隔を大きくすれば活動量が增大するわけではないことが分かった。

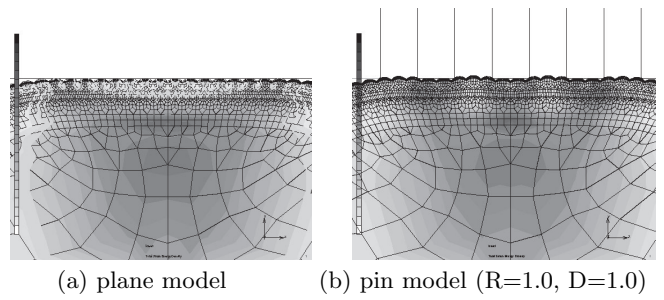


Fig.4 Examples of the shape effects.

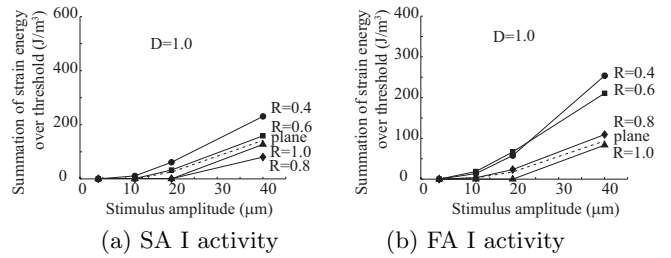


Fig.5 Effects of the diameter R .

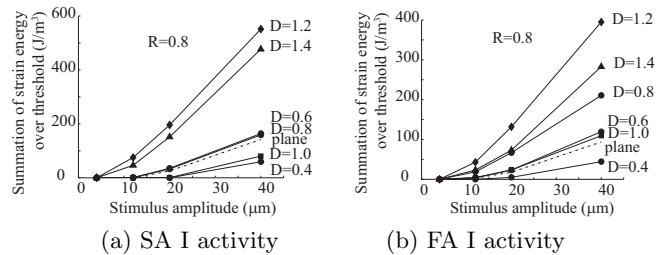


Fig.6 Effects of the distance D .

5. まとめ

本稿では、低周波振動を用いた静的圧覚ディスプレイを開発するために必要な、振動子形状が触覚容器活動に与える影響について評価した。今後、心理物理実験によって、振動子形状の影響を検証する予定である。これらの結果より、効率的に SA I を刺激する振動子を設計したい。

参考文献

- 1) 昆陽, 横田, 前野, 田所, 低周波振動刺激によって起こる静的圧覚の呈示条件, 第 11 回ロボティクスシンポジウム, pp.179-185, 2006.
- 2) 昆陽, 音川, 前野, 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, 1P1-N-101, 2005.
- 3) 前野, 小林, 山崎, ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学関係, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 63, No. 607, pp. 247-254, 1997.
- 4) 昆陽, 前野, 微細テクスチャ触感の評価のための精密なヒト指腹部有限要素モデルの構築, 日本機械学会第 18 回計算力学講演会講演論文集, No.05- 2, pp.707-708, 2005.
- 5) Freeman, A. W. and Johnson, K. O., A Model Accounting for Effects of Vibratory Amplitude on Responses of Cutaneous Mechanoreceptors in Macaque Monkey, J. Physiol., Vol. 323, pp.43-64, 1982.