

接線方向刺激を用いた触感呈示法

(第2報：指腹部有限要素モデルを用いた振動刺激波形の影響の解析)

Method for displaying tactile sense using stimuli in tangential direction
(2nd Report : Analysis on effect of waveform of vibrating stimuli using FE model of finger)

非 多々良尚愛(慶大) 正 前野隆司(慶大)

Naoe TATARA, Keio University, 3-14-1, Hiyoshi, Kouhoku-ku, yokohama 223-8522
Takashi MAENO, Keio University

As a basis for eliciting tactile sense by sliding finger on the surface of objects, it is necessary to understand the property of time and space distribution of the strain energy at the position each mechanoreceptor is located, and to produce the same distribution patterns of strain energy. First, we analyzed the distributions of strain energy when finger touches the real objects having different wavelengths of the uneven surfaces changing sliding velocities using Finite Element method. We also analyzed the distributions of strain energy by applying vibratory wavy stimuli in tangential/normal direction on the surface of the skin with various wavelengths, amplitudes, and frequencies. As a conclusion, we found the most suitable waveform to produce the similar distribution pattern of strain energy as one produced by touching the real object. We also found the wavelength which can stimulate Merker's cell and Meissner's corpuscle most effectively for each.

Key Words: Tactile Display, Biomechanism, Virtual Reality, Tele-existence

1. はじめに

毛利ら⁽¹⁾は本研究の第1報において粗さ感呈示のために必要な要素を調べる解析および実験を行い、実験を行った範囲では波状刺激の波長の粗さ感への影響は小さいという結果を得た。しかし、弾性体表面に波状刺激を与えると、ある深さでの応力テンソルの対角和は、深さと波数ベクトルの絶対値の積によって、指数関数的に減衰していくことが知られており⁽²⁾、種類ごとに異なる深さに配された触覚受容器に刺激を最も伝達しやすい刺激波長が存在すると考えられる。また、実際の凹凸面に対する動的触察時の触感を再現するためには、各触覚受容器位置における刺激の時空間分布を再現する必要があると考えられる。以上より、本報では、有限要素法によるシミュレーションを行い、凹凸面に対する動的触察時および、指表面に波状刺激を与えた場合における、各触覚受容器位置でのひずみエネルギーの時空間分布を解析し、触感再現が可能な波状刺激の方向とその波長を探索し、触覚ディスプレイの設計指針を得ることを目的とする。

2. 凹凸面に対する動的触察シミュレーション

まず、実際の凹凸面に対する動的触察時の各触覚受容器位置におけるひずみエネルギーの時空間分布を調べるため、第1報と同じ指モデルを用いた動的接触解析を行った。用いた対象面は振幅25 μm の剛体波面であり、波長は0.1mm, 0.2mm, 0.4mm, 1.0mmの4種類、剛体波面の接線方向への移動速度

は10mm/sec, 20mm/secの2種類とした。他の条件は第1報と同様である。解析結果から、各触覚受容器位置におけるひずみエネルギーの履歴を周波数分析した。得られた各周波数成分の振幅を A_1 と定義する。図1に、波長0.1mmの場合におけるひずみエネルギーの主周波数成分の振幅 A_1 の空間分布を示す。図より、マイスナー小体位置における A_1 の空間分布パターンは、剛体波面の波長が短い場合には接触端部で大きな値を示す二峰性を呈することがわかる。また、波長が長い場合には接触部全体に渡る多峰性を示していた。一方、メルケル細胞位置での空間分布パターンは、剛体波面の波長が短いときは接触部全体に渡る多峰性を、波長が長いときは接触部全体でほとんど同じ値をとる単峰性を示すことがわかった。また、いずれの波長および移動速度においても、マイスナー小体位置における A_1 の方がメルケル細胞位置の A_1 よりも全体的に大きくなる傾向があった。これは、小林ら⁽³⁾による解析結果と一致している。従って、実際と同様の触感を再現するには、触察対象となる波面の波長に応じて、各触覚受容器位置における A_1 の時空間分布が同様となるような刺激波の形状と波長を選択する必要があると言える。

3. 波状進行波刺激によるシミュレーション

次に、進行波状刺激を指モデル表面に与える動的接触解析を行った。定在波ではなく進行波刺激を用いたのは、波状刺激の節や腹の位置に依存しないひずみエネルギーの時空間

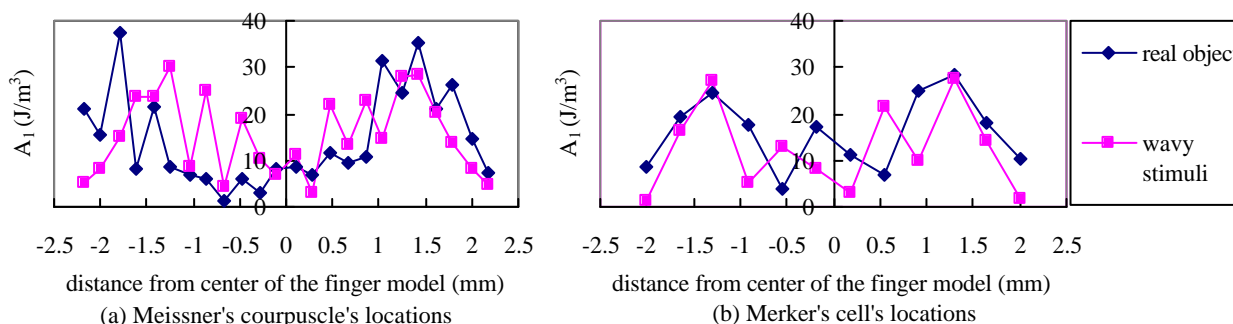


Fig. 1 Comparison of frequency response components distribution of strain energy at the mechanoreceptor's position by dynamic touch on the real object and longitudinal wavy stimuli

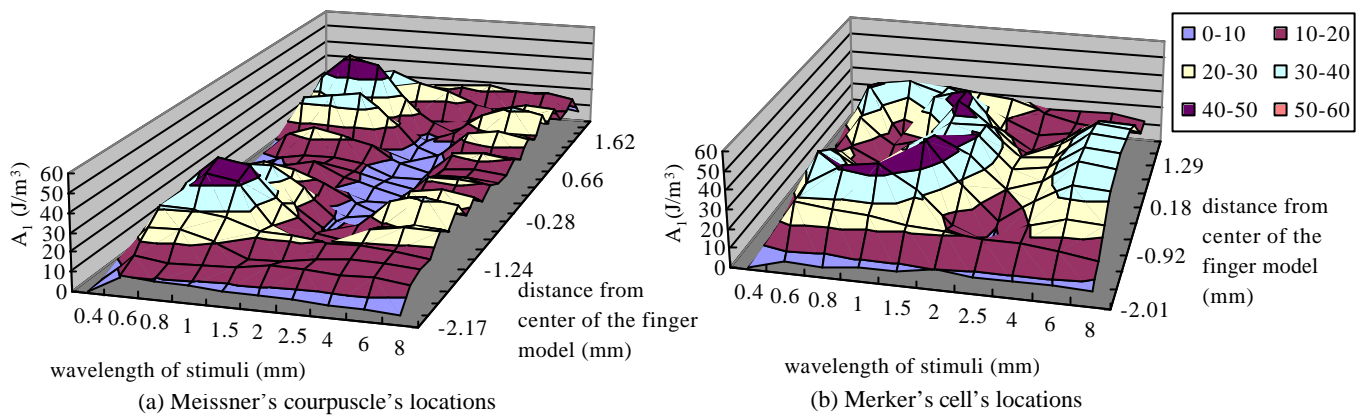


Fig. 2 Main frequency response components distribution of strain energy at the mechanoreceptor's position by vibratory longitudinal wavy stimuli (in case of : frequency of vibratory stimuli : 25Hz, Amplitude of vibratory stimuli : 12.5 μ m)

分布を得るためである。波状刺激は、剛性の低い板状の有限要素モデルの各節点に様々な波長，振幅，周波数で強制変位を与えることによって表現した。本報では，指表面を刺激する方向が接触面に対して法線方向となる波状刺激を横波状刺激，接線方向となるものを縦波状刺激と呼ぶ。波状刺激のパラメータは以下のように変化させた。

波長：0.4mm，0.6mm，0.8mm，1.0mm，1.5mm，2.0mm，2.5mm，4.0mm，6.0mm，8.0mm

振幅：5.0 μ m，12.5 μ m 周波数：25Hz，50Hz

これらの解析結果に対して2節と同様の処理を行った。

)縦波状刺激を与えた場合

波状刺激の振幅が12.5 μ m，周波数が25Hzの場合における両触覚受容器位置での A_1 の空間分布を図2に示す。図2より，メイスナー小体位置での A_1 の空間分布パターンは，刺激波長によらず接触端部付近で最も大きな値をとる多峰性を示すが，メルケル細胞位置では空間分布パターンが刺激波長に依存して変化することがわかる。また， A_1 の大きさは刺激波長によって異なり，メイスナー小体位置に刺激の変化を最も伝達しやすい刺激波長は0.8mm，メルケル細胞存在位置では1.5mmであることがわかる。この傾向はいずれの周波数，振幅でも同様であり， A_1 の値は振幅にほぼ比例していた。実際の凹凸面に対する触感を再現するためには，2節で述べたようにメイスナー小体位置での A_1 の方がメルケル小体位置での A_1 よりも全体的に大きくなる必要がある。従って，縦波状刺激によってこの条件を満たすためには，刺激波長が0.8mm前後であることが望ましいと考えられる。

)横波状刺激を与えた場合

解析結果から，各触覚受容器位置における A_1 の大きさは，縦波状刺激を与えた場合と同様に刺激波長によって異なり，各触覚受容器に刺激の変化を最も大きく伝達できる刺激波長が存在することを確認した。一方， A_1 の空間分布パターンは，メイスナー小体位置では，刺激波長によらず接触端部付近で最大値をとる多峰性を示すが，メルケル細胞位置では刺激波長によらず接触部全体でほぼ同じ値をとる単峰性を示すことがわかった。メルケル細胞位置での空間分布パターンの特徴と，低次の周波数成分は主にメルケル細胞によって振動として検出されるという従来⁽⁴⁾の見知から，横波状刺激は比較的長い波長を持つ凹凸面に対する触感再現に適していると考えられる。

4. 重畳波状刺激による検証シミュレーション

波長0.8mmの縦波状進行波刺激によって，波長0.1mmの凹凸面を10mm/secで移動させた場合の各触覚受容器位置でのひずみエネルギーの時空間分布を再現する検証シミュ

レーションを行った。まず，2章の結果からひずみエネルギー振幅の各周波数成分が最大値をとるメイスナー小体位置を調べ，縦波状刺激によるメイスナー小体位置での A_1 の最大値が同じ値をとるように振幅を調節し，各周波数の調和波を重ねた。波状刺激モデルの各節点に重畳波による強制変位を与えて3節と同様に解析を行った。主周波数成分を2節のシミュレーションと比較した結果を図1に示す。図1を見ると，周波数成分の大きさや空間分布パターンは完全には一致していないが，全体的な傾向はよく似ている。また，メルケル細胞およびメイスナー小体の受容野は半径1~3mmであるため，分布が多少異なっているが，ヒトはその違いを知覚しないと考えられる。これらより，実際の面とは波長の異なる縦波状刺激によって擬似的に触感を呈示できる可能性を確認した。

5. おわりに

本報では有限要素解析によって，各触覚受容器に刺激の変化を最も伝えやすい刺激波長が存在することを確認した。また，実際の凹凸面に対する触感を再現するには，対象とする凹凸面の波長によって適切な刺激波形状を選択する必要があり，対象面の波長が短い場合には，刺激波長が0.8mm程度の縦波状刺激を用いればよいことを示した。今後は触感の再現性の評価方法を確立し，最適な波状刺激の合成方法について研究を進める。そして，触感呈示装置を再製作し，実際の凹凸面に対する動的触察時の触感との比較実験を行う。

謝辞 本研究の一部は科研費補助金13650285により行われた

参考文献

- (1) 毛利他：接線方向刺激を用いた触感呈示法(第1報：触覚ディスプレイの製作と粗さ感の呈示)，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'2002(2002)
- (2) 小林他：ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係(第3報，凹凸を有する面と指との接触解析結果)，機論(C)，Vol.65，No.636，pp.289-295，(1999)
- (3) Hiroyuki Shinoda et al：A Tactile Sensor using Three-Dimensional Structure，Proc.1993 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation，pp.435-441(1993)
- (4) William H. Talbot. et al：The Sense of Flutter-Vibration: Comparison of the Human CA1acity With Response Patterns of Mechanoreceptive Afferents From the Monkey Hand, Journal of Neurophysiology，Vol.31，pp.301-334(1968)