

選択刺激子による触感の呈示

Tactile Feeling Display Using Selective Stimulator
to Superficial Skin Receptors

浅村直也 横山望 篠田裕之

Naoya ASAMURA, Nozomu YOKOYAMA and Hiroyuki SHINODA

東京農工大学 工学研究科

(〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16, asamura@cc.tuat.ac.jp)

Abstract : The human feels various tactile feeling by touching and rubbing the object lightly. In this paper, we propose a new method to display such tactile feeling with reality. We produce the feeling by selective stimulation to each kind of mechanoreceptors, using elastic transfer property of the skin. Our system is a sparse array of stimulators each of which controls both overall contact pressure and partial pressure on the skin, which stimulates the shallow and the deep mechanoreceptors in the skin selectively. The system is simple, but it could give several types of tactile feeling with reality, including fine texture. The principle and experimental results are shown.

Key Word : Tactile display, Tactile feeling display, Virtual reality, Tele-existence

1. はじめに

触知覚情報を呈示する技術に関する研究において、実際と見分けのつかないような触り心地、触感を呈示する技術は、非常に困難な将来の課題と考えられてきたように思われる。人間は表面の材質や、非常に微細な構造の違いもその触感によって見分けてしまう。人間が識別可能な触感の膨大なバリエーションを、何らかの装置の表面に対象と同じ材質や微細形状を忠実に再現することによって体感させることはほとんど不可能だからである。

本研究ではまず人間の皮膚の物理的特性と触覚受容器の特徴を眺め直し、皮膚表面への刺激の時間空間的パターンからどのような特徴を捉えて触感が決定されているかを考え直す。そしてその考察に基づいて、触感を呈示する一つの手法を提案する。ここで提案される装置はシンプルであるがいくつかの典型的な触感を呈示することができた。以下にその原理と触感呈示実験の結果を示す。

2. 触感を決定する要因

人間は対象に軽く触れさすることで毛皮や布地、木や金属の表面など、様々な触り心地を知覚・識別することができる。その感覚は能動的・受動的いずれの場合にも生じる[1]。また、注目すべき点として触情報を知覚する受容器の配置密度は皮膚の部位によって異なるにもかかわらず、触り心地は体のほとんどの部分で同じような感覚で知覚される。以下ではそのような物体表面の細かい構造や材質に関して得られる普遍的な情報を“触感”と呼ぶことにし、点字を読んだり、マクロな形状を認識したりする知覚とは区別することにする。

人間がどのように触感を決定しているかを検討するためにまず、皮膚表面の応力がどのように内部に伝達するかを考える。弾性体表面に応力を与えた場合、表面の細かいパ

ターンは内部へとボケながら伝達する。人間の皮膚が半無限均質な弾性体であると仮定するならば、その減衰特性は容易に計算される。ここで、特に注目する物理量として応力テンソルの対角和（以下これを単に「圧力」と呼ぶ）を考える。

弾性体内部のある深さ z で皮膚表面に平行な面内の圧力分布を $P_z(\mathbf{k})$ とし、皮膚表面の圧力分布を $P(\mathbf{k})$ とする（ここで、 \mathbf{k} は波数ベクトルで $\mathbf{k} = (k_x, k_y)$ である）。このとき $P_z(\mathbf{k})$ と $P(\mathbf{k})$ は

$$P_z(\mathbf{k}) = P(\mathbf{k}) \exp(-|\mathbf{k}|z) \quad (1)$$

のように結ばれ[2]、各周波数成分は弾性体内部で指数関数的に減衰する。

式(1)をもとに人間の皮膚構造と触感決定の要因について検討する。人間の手掌部において、表層受容器（マイスナ小体）と深層受容器（パチニ小体）は皮膚表面よりそれぞれ 0.7mm と 2mm の位置にあるといわれている(Fig. 1)。このとき例えば、波長 2mm の空間周波数成分の圧力は表層受容器においても 1/9、深層受容器では 1/500 程度まで減衰する。波長が 1mm の成分は表層受容器の深さですら、1/81 まで減衰する。

一方、人間がミクロンオーダーの表面性状の違いをも識別することは広く知られている[3]。しかし、以上の考察からこの知覚の際に皮膚表面に生じた応力分布を詳細に検出して触感を決定しているとは考えにくい。それよりも、スティックスリップや指紋に起因する数 mm よりも大きい波長の空間周波数成分を各受容器が知覚することで触感決定がもたらされていると思われる。そこで、物体表面の細かい構造に起因して得られる触感を決定する主要な要因は、

- (1) 各皮膚機械受容器が知覚する刺激の時間波形

(2) およびその皮膚表面での巨視的な空間移動

のみであり、言い換えれば、「皮膚の表層および深層受容器を選択的に異なった時間波形で刺激できれば、刺激分布が疎でも細かなテクスチャの触感まで呈示可能である。」とする仮説を立てた。この仮説をもとに、本研究では触感呈示システムを製作する。

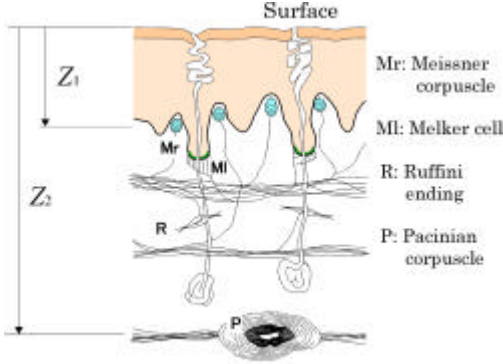


Fig. 1: Vertical section through the glabrous skin of the human hand[4].

3. 選択刺激法

本研究の装置は穴の開いた振動子とその穴の中の空気圧を制御する機構とで構成される(Fig. 2)。振動体表面には直径 2mm の窪みがある。穴の中の空気圧は動電駆動のピストンによって制御される。この装置によって 2 種類の刺激が可能である。

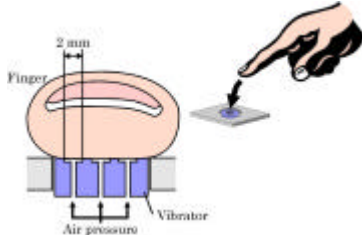


Fig. 2: The structure of our tactile feeling display. The air pressure stimulates only shallow receptors, while the overall vibration stimulate both shallow and deep receptors.

i) 空気圧による表層刺激

呈示面に指をのせ、振動子表面の窪みと皮膚との間の空間に空気圧 $P(t)$ を生じさせる。もしここで、呈示面が十分硬ければ、エッジのまわりの皮膚は動くことができないから、エッジからは空気圧と逆方向に空気圧の総和を打ち消すような圧力を受ける (Fig. 3) したがって、空気圧による皮膚への刺激は深層部には伝わらず、皮膚表層のみを刺激する。

ii) 深層受容器への刺激

一方、振動子自体の振動は表層・深層両方の受容器を刺激できる (Fig. 4) だたし、いずれのモードにおいても、与えられる表面応力は垂直成分のみであり、皮膚表層と深層の間にある受容器[メルケル触盤、ルフィニ終末]への刺激を特定することはできない、という制約がある。

Fig. 5 は皮膚を半無限均質な弾性体と仮定したときの、加圧円の中心から深さ z での内部応力の理論値を示す。図か

ら、例えば加圧円の半径 r_0 を 1mm にした場合、深層受容器が存在する深さ 2mm での圧力は表層受容器の存在する深さ 0.7mm での圧力の 7% になり、単一の刺激素子によって表層受容器のみに刺激を与えることができることになる。

この方法は以前提案した微小磁石を用いた装置[5]よりも完全な選択刺激を可能とする。

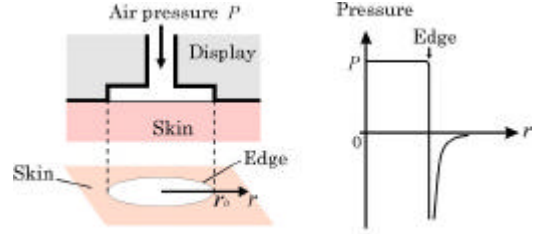


Fig. 3: The pressure distribution on the skin under the air pressure. If the skin at the cave edge can not move, the total force onto the skin becomes zero.

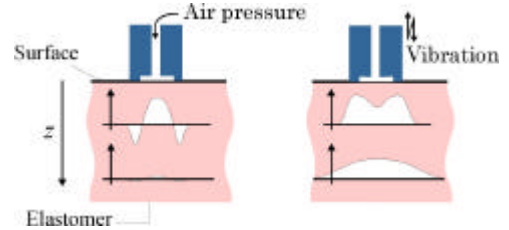


Fig. 4: Two kinds of stimulation mode. The air pressure stimulates shallow receptors, while the overall vibration stimulates both shallow and deep receptors.

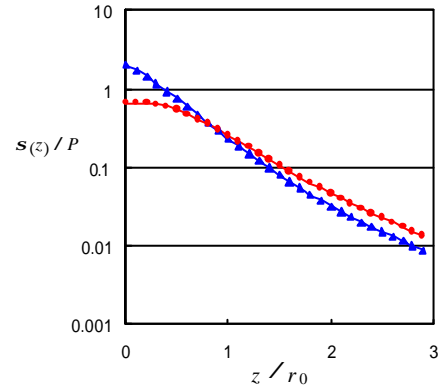


Fig. 5: Isotropic pressure $S_{xx} + S_{yy} + S_{zz}$ () and normal stress S_{zz} () in the elastic body vs. the depth z under the center of the air pressure circle.

4. 装置の試作

皮膚と呈示面の窪みとの間の空気圧はFig. 6のような動電駆動のピストンによって制御される。Fig. 7 は呈示面に圧力センサを配置し、装置に一定振幅の正弦波を入力して計測した周波数特性で、300Hz 程度まで平坦な特性が見られた。

ここで、圧力と入力電圧の対応は

$$1[\text{V}] \quad 280[\text{Pa}] = 2.8[\text{gf/cm}^2] \quad (100\text{Hz において})$$

である。Fig. 6 (c) は実験装置の外観である。呈示面には皮膚表層を刺激するための直径 2mm の窪みが 2.5mm 間隔で一直線状に設けられている。

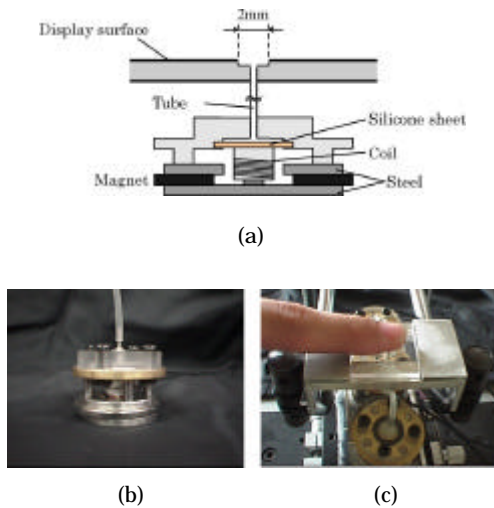


Fig. 6: The apparatus for controlling the air pressure in the cave. The structure (a), and the photograph (b). The over view of our display system (c).

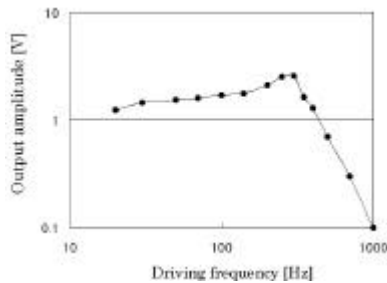


Fig. 7: Air pressure in the cave vs. frequency, under constant amplitude of sinusoidal driving voltage.

5. 基礎実験

まず、人間が空気圧による刺激領域内でのさらに詳細な圧力分布の違いを見分けることが可能であることを確かめるために空気圧のかわりにピンが振動する装置を用いて以下のような実験をおこなった。

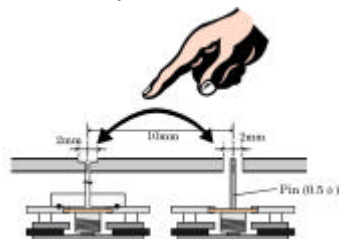


Fig. 8: Set up of the air-pin discrimination test.

<1> 実験方法

7名の被験者に対し、ピンと空気のどちらかの刺激をランダムに呈示し、感じた刺激がどちらであったのかを答えてもらう。実験に使用した信号は、振幅 3[V]の 20Hz 正弦波*、振幅 3[V]の 100Hz 正弦波、ランダム位相信号**、パルス列信号***の 4 種類を使用し、それぞれの信号について 20 回ずつ実験をおこなった。刺激の呈示部位は指先と母指球の 2 箇所とした。測定の間、装置の駆動音により刺激の違い

* 被験者が感じることでできる最小閾値は 100[Hz]で約 200[Pa] (2 [gf/cm²]) であった。

** 2[V]の均一な強度を持ち、位相はランダムである信号。

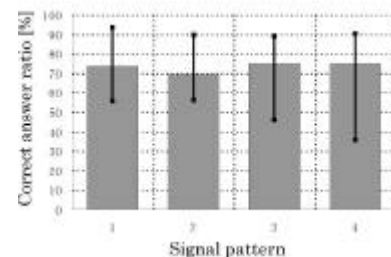
*** 各パルスの幅は 0.5[ms]、高さ 6[V]とし、発生頻度は 6[pulse/s]でランダムに発生させる。

いが識別できないようにヘッドホンを装着してもらう。空気圧とピンの信号強度は、体感される刺激強度が空気圧のものと同じになるようあらかじめ調整した。

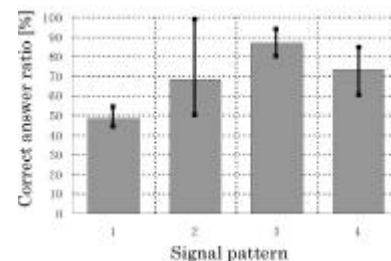
<2> 実験結果

Fig. 9は各被験者の刺激の識別の正解率を平均したものである。ピンと空気では刺激領域内での圧力分布が明きからかに異なるにもかかわらず、指先、母指球いずれの部位においても刺激を完全に識別することはできなかった。

ここで特筆しておくべきことは、例えば、振動しているピン単体に触れた場合(この場合皮膚表層・深層両方が刺激される)と、この実験のように穴を通して接触し、表層受容器のみを刺激した場合は、同じピンによる振動でも、明らかに感じ方が異なることである。このことは、一面において人間が非常に詳細な圧力分布を見分ける能力を有していることを示している。しかしこの基礎実験のように、皮膚表層のみに圧力が伝達するよう限定されている場合には、直径 2mm の刺激領域内での圧力分布の違いを見分けることはできなかった。



(a)



(b)

Fig. 9: Correct answer ratio of the pin-air discrimination test for fingertip (a) and thenar (b), for signal patterns 1: sinusoidal wave of 20 Hz, 2: sinusoidal wave of 100Hz, 3: random phase signal and 4: pulse sequence.

6. 触感呈示実験

表層受容器のみを刺激する素子を 3 個用い、それを 2.5mm 間隔に一直線状に配置して触感呈示実験をおこなった。(ここでは皮膚深層にも刺激を与えるための機構は用いていない。)

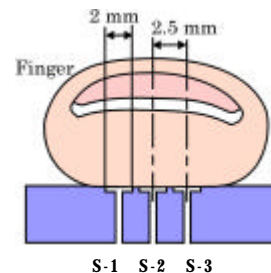


Fig.10: An apparatus having three superficial stimulators.

[1] 刺激の横方向移動

刺激

各刺激素子 S_n ($n=1,2,3$)を次のような信号で駆動する。

$$P_n(t) = A \frac{t - nT}{t} \exp \left\{ -\frac{(t - nT)^2}{t^2} \right\} \quad (2)$$

ただし、 $A=10$ [V]である。(Fig. 11 参照)

結果

信号の切換え間隔 T がある条件を満たすとき、細い物体が皮膚表面を連続的に滑らかに移動していく感じがした。

Fig. 12 は各素子への遅延時間 T を変化させたときの感じ方の違いを示したものである。

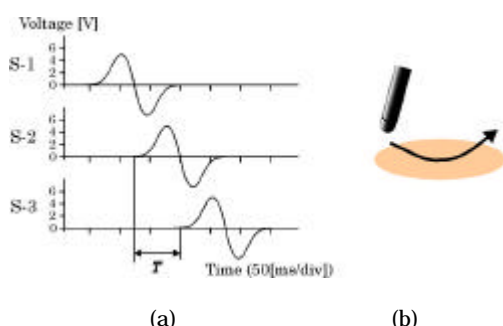


Fig. 11: Signal waveforms of the stimulators (a) and the image of tactile feeling (b). Subject felt as if an object moved on the skin smoothly.

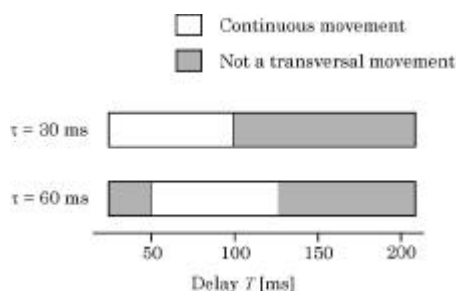


Fig. 12: Tactile perception vs. delay T for Gaussian signals.

[2] ブラシの移動感呈示

刺激

Fig. 13 のように各刺激素子にキャリア周波数 f のガウス包絡信号を与える。各素子への遅延時間は $T = 75$ [ms] とし、包絡の形状は変化させない。

結果

キャリア周波数 f が 40-70Hz の間、被験者はブラシのようなもので皮膚を摩られているかのような感じを受けた。 f が 80Hz を越えると、被験者は現実的な触感になぞらえることはできなかった (Fig. 14) なお、この実験で得られた触感は非常にリアルなものであったが、その感じ方と見分けの付かない実物のブラシを見出しているわけではないことを断っておく。また、被験者は呈示された刺激の感じ方を答える前に「ブラシ」という言葉を聞いたこと(被験者は「これはブラシに似た触感ですか?」という問いに対して「はい」と答えた。)を付記しておく。

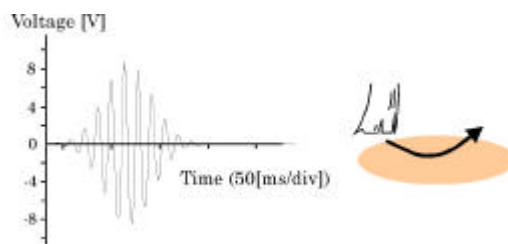


Fig. 13: Signal waveform of each stimulator and the image of tactile feeling. Subjects felt as if a brush was on the skin.

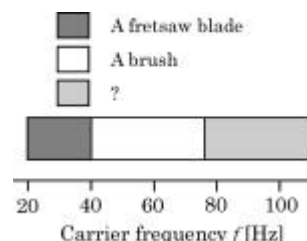


Fig. 14: Tactile feeling vs. carrier frequency of signal.

7. 考察

本研究で呈示された触感は一面で非常にリアルなものであった。しかし、本装置ではあらかじめ刺激呈示面に皮膚が触れてしまっているため、実物(例えばブラシ)の刺激と装置の刺激を交互に与えてそれらを識別させるといった客観的評価が困難なのが現状である。

今後の研究の展開のためには、触感のリアリティを客観的に評価する指標の確立は急務である。また、現段階での本研究の触感呈示装置は刺激点が線状配置であるため、呈示可能な触感も限定されている。素子を面状配置し、どれだけ多様な触感が呈示可能かを実験的に調べながら本研究の仮説を検証していく予定である。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会未来開拓推進事業 JSPS-RFTF96P00801 の支援のもとで行われた。

参考文献

- [1] G. D. Lamb, "Tactile Discrimination of Textured Surface: Psychophysical Performance Measurements in Humans," J. Physiol. Vol. 338, pp.551-565, 1983.
- [2] H. Shinoda, M. Uehara and S. Ando, "A Tactile Sensor Using Three-Dimensional Structure," Proc. 1993 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.435-441, 1993.
- [3] 宮岡 徹, "人の触感覚情報処理", トライポロジスト, 第 40 巻, pp. 500 - 505, 1995.
- [4] R. S. Johansson and A. B. Vallbo, "Tactile Sensory Coding in the Glabrous Skin of the Human Hand," TINS, pp. 27-32, 1983.
- [5] N. Asamura, N. Tomori and H. Shinoda, "A Tactile Feeling Display Based on Selective Stimulation to Skin Receptors," Proc. IEEE VRAIS '98, pp. 36-42, 1998.