

# 高密度・大面積電気触覚ディスプレイにおける感覚安定化 Sensation stabilization of large area, dense electro-tactile display

梶本裕之 館暲

Hiroyuki KAJIMOTO, Susumu Tachi

東京大学大学院情報理工学系研究科

Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

**Abstract** In Electro-tactile display, large spatial variance of stimulation threshold makes stable stimulation of numerous electrodes difficult. We show that the problem is caused by a variance of electrical impedance of the skin, and propose to suppress the variance by optimizing pulse width. We found out that 10 to 20 [ $\mu$ s] pulse width is optimal for that purpose, and fabricated testbed display with 64 electrodes.

## 1. 背景

経皮電気刺激を用いた触覚提示[1]は、機械的な振動を用いた触覚提示手法に比べ極めて正確な時間分解能で神経活動電位を生じさせ得るため、今後の触覚情報処理研究に必須の標準的刺激手法になり得ると期待される。

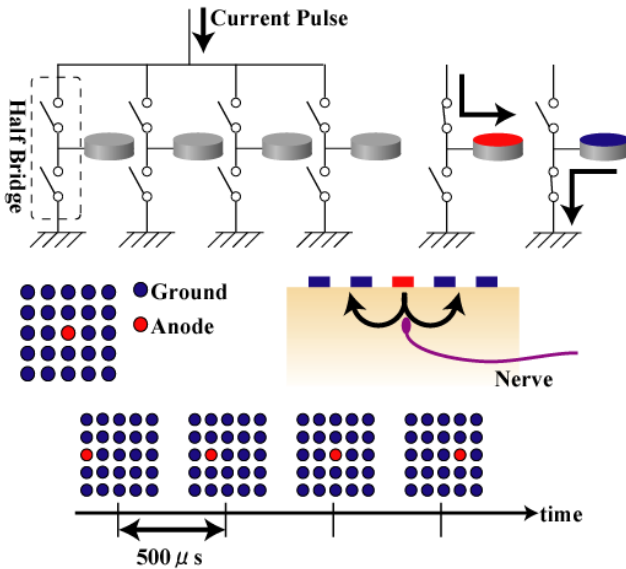


Fig. 1 Basic system of electro-tactile display.

我々の採用している二次元マトリクス電極による電気刺激システムの概要を Fig. 1 に示す。各電極はハーフブリッジ (Half Bridge)回路として知られる 2つのスイッチにより電流源とグランドに接続することが可能である。このスイッチを切り替えることにより、各電極は電流源、あるいはグランドとして働く。刺激したい場所の電極を電流源、その他の電極をグランドとすることにより、皮膚下に電流経路を形成し、神経を刺激する。さらにこの刺激点を時間的に切り替えることによって面的な情報を呈示する。我々が想定している使用状況は、2.0[mm]間隔の電極で指先第一関節を覆うというものであり、50ないし100個程度の電極が必要である。

### 1.1 課題：閾値のばらつき

しかし実際に多点の電極を用いたパターン提示に利用する場合、刺激場所ごとの電流閾値のばらつきが大きいため、安定して大面積の感覚提示を行うことが出来ない。

これは本質的には、電気刺激による神経発火が閾値現象で

あるためである。具体例を挙げれば、あるパルス幅の電気刺激で感覚を生じる電流閾値が 1[mA]程度である時、2倍の 2[mA]で耐え難いほどの感覚強度を生じてしまう。

一方で乾式電極を用いた電気触覚ディスプレイでは、刺激場所に依存して2倍程度の電流閾値のばらつきは容易に生じる。このため複数点の電極に同時に感覚を生じさせる場合、全ての電極で感覚を生じるような電流値を用いると、閾値の低い刺激点では耐え難い強さの刺激を受けることになってしまう。

この問題への根本的対処としては、皮膚インピーダンスと電流閾値の関連を求める試みがある[2][3]、しかし現在のところ確定的なインピーダンスと電流閾値の間の相関関係は得られておらず、多点電極を安定的に刺激する手法は確立しているとは言い難い。

本稿では予備の実験として、刺激部位を変えた場合の刺激パルス幅、および「パルス高さ（電流値）の分散」の関係を求める。パルス幅とパルス高さの関係自体は 1900 年代初頭から詳しく調べられているが、実際に電気触覚ディスプレイで問題となるのは上述の様に閾値そのものではなく、閾値のばらつきであるためである。

## 2. 実験

Fig. 2 のように 8 個の刺激電極とその周囲の接地電極からなる電極マトリクスを用い、電流閾値のばらつきを調べた。電極直径は 1.0[mm]で、防錆のため表面に金メッキを施している。右手人差指を電極マトリクスに載せ、実験中は指を動かさないよう指示した。

刺激パルス幅を 10, 20, 50, 100, 200, 500 [ $\mu$ s] の 6 種類とし、電流閾値を極限法で求めた。まず電流初期値として予備実験で求めた各パルス幅における電流閾値の半分から開始し、30[pps], 0.5[s]のパルス群を与えた。感覚を生じない間は試行ごとに電流量を 1.5 倍した。感覚を生じたら次に感覚を生じなくなるまで電流量を 0.8 倍した。最後に感覚を生じるまで電流量を 1.05 倍した。このプロセスにより 5%の刻み幅で電流閾値を求めた。

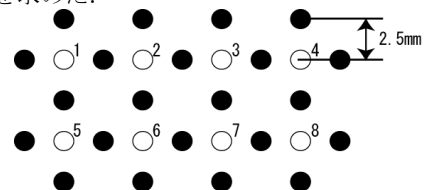


Fig. 2 Electrodes placement. White circle: stimulating electrode. Black circle: Ground electrode.

刺激場所, パルス幅はランダムに選択される. 各場所(8箇所)とパルス幅(6種類)の組み合わせごとに6回, 合計384回の刺激を行った. Fig. 3にパルス幅とパルス高さの関係を示す. 良く知られた単調減少関数が得られている.

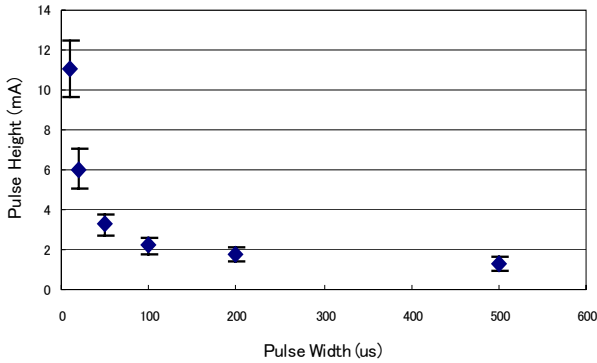


Fig. 3 Current threshold as a function of pulse width.

次にパルス幅と「パルス高さのばらつき」の関係を Fig. 4に示す. 横軸は対数表示のパルス幅であり, 縦軸は電流閾値の標準偏差を電流閾値で割った比率である.

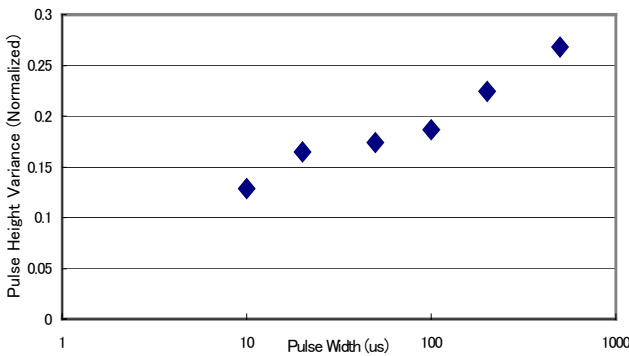


Fig. 4 Variance of current threshold as a function of pulse width.

## 2.1 考察

Fig. 4から, 電流閾値のばらつきは, パルス幅に対して単調増加の傾向にあることが分る.

従来, 電気刺激のパルス幅は「エネルギー最小化」を規範として最適化されてきた. 電気刺激で多く用いられる 200~300[ $\mu$ s]というパルス幅は Fig. 3のようなパルス幅とパルス高さの関係から最小エネルギーを与える点を求めることによって得られたものである. これに対して今回の実験結果は, 従来用いられてきたパルス幅に比べて極端に短い 10~20[ $\mu$ s]のパルス幅を用いることが, 刺激の空間的ばらつきを押さえる上で効果的であることを強く示唆している.

なぜ電流閾値のばらつきにパルス幅に対する依存性が存在するのだろうか. 経皮電気刺激において刺激電流は, 「皮膚」および「神経軸索」の二つの電気的フィルタを通過すると考えられる. 閾値のばらつきがこの二つのフィルタの特性のばらつきによって生じるというの自然な考えであろう.

このとき, 神経軸索の電気的特性のばらつきが閾値に大きな影響を及ぼしているとは考えにくい. その理由は第一に, 有髄神経において神経の刺激しやすさは軸索直径に依存するが, 神経軸索の太さはその種類ごとにほぼ一定である事が知られているためである. また第二の理由として, 第二に現

在測定しているのが「感覚閾値」であることが挙げられる. これは電極位置付近に存在する神経群のうち, 「最も発火しやすい」神経の発火閾値と等価であると考えられる. この「最大値選択性」, および存在する神経軸索の本数の多さから結局, 神経軸索に起因する閾値のばらつきは低く抑えられると考えられる. (複数のサイコロを振ったときの「最大の」目の数が, サイコロが多数なら常に6である事に類似している)

これに対して皮膚の電気的フィルタは空間的にも時間的にも大きなばらつきが存在すると考えられる. 特に指先の電気刺激にとって重要なことは, 皮膚自体が特異的に厚い角質層を持ち, (指先で 600[ $\mu$ m], 他の体部位では 15[ $\mu$ m]程度), この層がもつ電気的 High-Pass フィルタ特性は 1~10kHz 程度である. これはパルス幅で言えば 100~1000[ $\mu$ s]にあたる.

つまり従来の, エネルギー消費量を最小に抑えるという観点から導き出された 200~300[ $\mu$ s]というパルス幅は, 指先に限って言えば皮膚の電気的フィルタ特性の変化点に当たり, 特性のばらつきの影響を最も強く受けてしまう領域であったといえる.

これに対して今回の実験で得られたパルス幅 10~20[ $\mu$ s]の刺激は, 皮膚インピーダンスの影響を被りにくい. これが電流閾値のばらつきを押さえられた原因であると考えられる.

## 3. まとめと今後の課題

電流閾値のばらつきが皮膚インピーダンスのばらつきに起因するという自体は従来研究でも指摘されている. ばらつきを抑える手法として従来はインピーダンスのリアルタイムセンシングとそれに依存した提示による解決を試みているのに対し, 今回の提案はパルス幅を極端に短くするのみで効果的な安定化が可能であることを示唆している.

なお我々は既に指先形状に合わせた 64 点の電極(縦 1.25[mm]間隔 16 個, 横 2.5[mm]間隔 4 個)を持つ刺激装置を開発し, 今回述べた短パルス幅による刺激が感覚の空間的安定化に貢献することを確認している(Fig. 5).

今回の実験では, 閾値のばらつきを, 「時間的変化」, 「空間的ばらつき」を混合した現実的な状況で測定した. 時間変化と位置変動のいずれがより大きな要因となっているかは今後検討すべき興味深い問題である.

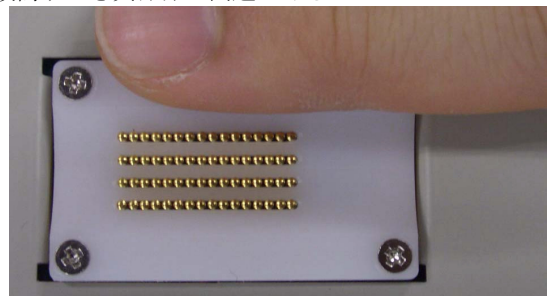


Fig. 5 Electro-tactile display with 64 electrodes.

## 参考文献

- [1] 梶本, 川上, 前田, 舘: 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(第2報), 皮膚インピーダンス依存制御, 日本バーチャルリアリティ学会 第5回大会論文集, 2000.
- [2] 渡辺, 渡辺, 大庭, 二宮, 星宮, 半田: 皮膚電気刺激における受容感覚の安定化に関する基礎的検討, 信学技法, MBE98-89, pp.33-40, 1998.
- [3] 高橋, 梶本, 川上, 舘: 電気触覚ディスプレイにおける提示感覚の安定化法, 日本バーチャルリアリティ学会 第8回大会論文集, 2003.