

皮膚インピーダンス情報のリアルタイムフィードバックを可能とする

電気触覚ディスプレイ

電気通信大学 ○梶本 裕之

Electro-Tactile Display with Realtime Feedback of Skin Impedance

The University of Electro-Communications, ○Hiroyuki KAJIMOTO

Abstract: Electro-tactile display is a tactile display composed of skin surface electrodes. It has many ideal features such as durability and energy efficiency, but it did not prevail as a standard device since quantity and quality of generated sensation is instable. One possible solution to the instability problem is to monitor skin electrical impedance. Previous works succeeded in measuring the impedance, but failed to construct true realtime feedback loop. In this paper, we show a new system that has a few microsecond feedback loop, which is sufficiently fast compared to ordinary electrical stimulation pulse (30 to 200 μ s).

1. 序論

電気触覚ディスプレイは皮膚表面に配置した電極からの電気刺激により皮膚下の受容器につながる神経軸索を駆動する触覚ディスプレイである。簡易な構成が可能であり、機械的駆動部が無く、騒音の問題も無く低消費電力化に向くなど、実用性の点で多くの利点を持つ。しかし生起感覚を完全に安定化させることが難しいという、やはり実用上の問題のため、現在のところ一般用途での普及に至っているとは言えない[1]。

生起感覚の安定化は、主に次の二つの問題に還元できる。第一に感覚の時間的変化という問題である。電気触覚ディスプレイの場合、汗などによる使用中の状況変化に対してロバストな刺激提示を行う必要がある。この問題は単一の電極でも生じる。

第二に、閾値の空間的ばらつきという問題である。主に皮膚の厚みの違いや部分的発汗によって閾値が大きく変化すると考えられる。この問題は特に多量の電極を並べた大面積型の場合に生じやすい。

この二つの問題の複合と言えるのが、電気触覚ディスプレイを皮膚とディスプレイが接触・非接触を繰り返すタッチパネルに採用した場合である。特に接触・非接触の切り替わりの瞬間に電流経路が変化しやすい

ため、独特のチリチリ感や、最悪の場合には感電による強い不快感を生じる。

1.1. 先行研究

電気触覚ディスプレイの感覚安定化の問題に対して、幾つかの解決策が提案されてきた。

感覚の時間的変化という問題に対しては、実用的な解決策として力センサによる押圧情報をフィードバックする方法が考えられた[1]。強く押した際に大きな刺激電流が流れるようにしておけば、ユーザは単純に、弱いと思えば強く押せばよい。単純なボリューム調整機能ではあるが、接触・非接触の切り替わり時の不快感も同時に解決されるという利点がある。接触状態が切り替わる際には押圧が変化するためである。

ただし本手法は、指先一本を押し当てるという状況では有効であるが、装着型の場合には適用できない。また空間的ばらつきの問題は解決できない。

感覚の空間的ばらつきという問題に対しては、刺激パルスを極端に短くする(20-50 μ s)ことである程度安定化できることが知られている[2][3]。これは恐らく短パルス(≒高周波)が皮膚角質というキャパシタンスを無視して皮膚下層に達することが出来るという、純粹

に電気回路的な現象であると考えられる。

このような電氣的な解決策は他にも幾つか提案されており、そもそも現在多く用いられている電流制御による刺激も、感覚の安定化および安全性の観点から導入された物である。また皮膚に供給される電気エネルギーを一定にするエネルギー制御の刺激手法も提案されている[4]。

より一般的にこの問題に取り組むには、皮膚電気インピーダンスの計測とフィードバックが王道であると考えられる。計測は刺激電極そのもので行う事が出来るため、皮膚上に新たなハードウェアを搭載する必要がない。

従来も計測した皮膚インピーダンスから皮膚回路モデルのパラメータを同定し、各パラメータと感覚閾値の関係を調べた研究は数多い[5]。また精緻なパラメータ同定を行わなくても、接触・非接触の切り替わりの瞬間の不快感を解消する手法としてインピーダンス情報は十分に活用できる。例えばタッチパネルを念頭に置いた例がある[6]。

しかし従来の研究では多くの場合、単一かごく少数の電極におけるインピーダンス計測および閾値計測が行われたのみであり、「(百程度の)多電極で」「リアルタイムに」インピーダンス計測と刺激調整が行われた例は無い。

従来手法がリアルタイムでないというのは次のような意味である。従来のインピーダンス計測に基づく電気刺激制御は、刺激パルスの前に感覚を生じない程度のパルスを与えて計測し、刺激パルス自体はフィードフォワードで与える(Fig. 1)。厳密にリアルタイムではないが、この短時間ではインピーダンスの急激な変化は考えにくい、というのがこの手法の根拠である。

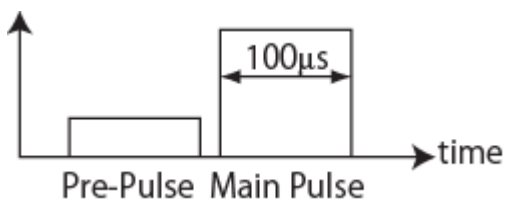


Fig. 1 Combination of measuring pulse and stimulating main pulse.

1.2. 従来手法の問題点

従来手法は、「測定用のパルスと刺激用のパルスを別々に用意し、刺激パルスはフィードフォワードで与える」とまとめることが出来る。

しかし実は、刺激電極が百程度に及ぶ実用的な状況では、次に述べる理由から従来手法で刺激の安定性を保証するのは難しい。

多数の電極を駆動するためには、同時に全電極を駆動することは現実的ではなく、各電極を刺激電極と不関電極(グランド)のどちらかに切り替えて刺激することになる[1] (Fig. 2)。この方式では(CRTモニタのように)同時に刺激される点は常に一点であり、高速に走査されることでパターンが提示される。

すると実はほとんどの時間、いずれかの電極は刺激中であることが分かる。例えば50点を50Hzのリフレッシュレートで刺激する場合、一点の刺激にかけられる時間は $20\text{ms} / 50 \text{点} = 400 \mu\text{s}$ でしかない。刺激パルスが例えば $100 \mu\text{s}$ であれば、刺激時間全体の中で $1/4$ の時間が刺激パルスを与えている時間となる。

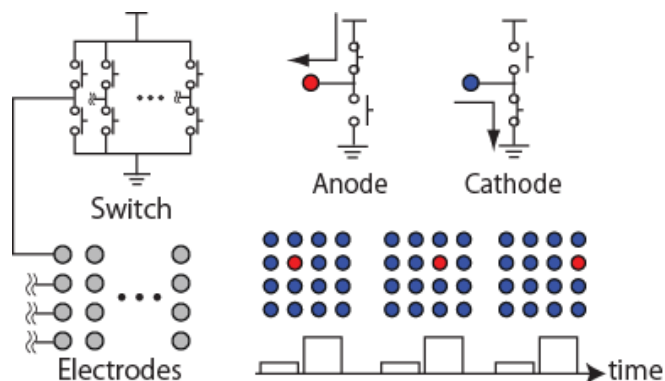


Fig. 2 Matrix scan display by half-bridge switching circuits.

よってこの場合、あるランダムなタイミングで指の接触・非接触が生じたとき、いずれかの電極が刺激パルスの通電中である可能性は25%にも上ることになる。つまり従来の手法は、電気刺激の危険を $1/4$ に低減しているが、0には出来ていないと言える。当然刺激点数が増えればこの可能性はさらに増大する。

もちろんこの場合チリチリ感を生じる電極は一点に過ぎない。また連続的な痛みを生じないという点では優れた安全装置になっていると言える。しかし電気触覚ディスプレイを実用に供するには、一点の瞬間のチ

リチリ感も許されないとすれば、結局従来の方法では安定化の問題は完全には解決できていないといえる。

さらに皮膚インピーダンスは電圧に応じて大きく変化することが知られており、計測パルスが刺激パルスとレベルが異なることで計測結果の有用性にも疑問が生じる。接触・非接触の判定は出来ても、インピーダンス情報を用いたきめ細かな感覚安定化は難しいと考えられる。

2. 提案システム

本研究では皮膚の電気的インピーダンスに応じたリアルタイム電流制御によって感覚の安定化を試みる。単一パルスの内部で数回ないし10回程度のインピーダンス計測・刺激制御を行う(Fig. 3)。これにより従来分離されていた計測フェーズと刺激フェーズを統一することができ、インピーダンス情報に基づいた理想的なフィードバックを実現できる。

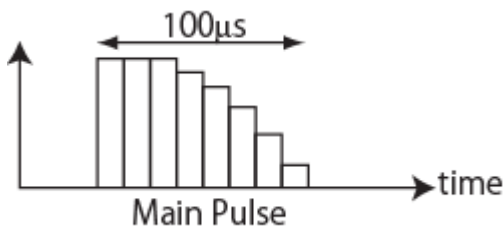


Fig. 3 Proposed Algorithm. Single stimulation pulse is divided into numerous sub-pulses, and controlled by realtime feedback.

2.1. システム構成

提案したフィードバックを実現するためには、刺激・計測のループを数 μs 以下に抑える必要がある。PCベースでこのフィードバックループを実現するのは非常に難しいため、制御の中心にはマイクロプロセッサを用いる。また刺激・計測用のDA・AD変換部はマイクロプロセッサの多くに内蔵されているが、変換時間がかかり今回の用途には向かない。特にインピーダンス情報を正確に取得するためには電流および電圧の同時計測が必要であるから、複数チャンネルを同時サンプリングできるAD変換器が必要である。

多くのアプリケーションに利用するため、刺激パターン自体はPCで生成し、高速なシリアル通信でマイコンに送信する。電極の個数にスケラビリティを持た

せるために1.2節で述べたスイッチ群を用い、電極数の増加にはスイッチの増設で対応できるようにする。

以上の要件に基づいたシステムをFig. 4に示す。

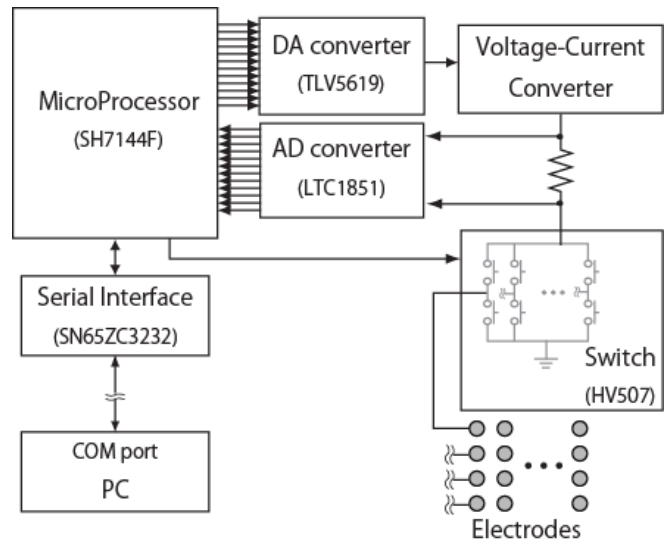


Fig. 4 System Structure

2.2. 構成要素

マイクロプロセッサには入手可能性、高速性、I/Oの豊富さからSH7144F(ルネサステクノロジ社製、25MHz)を用いた。

DA変換にはTLV5619(Texas Instruments社製、12bit、セトリングタイム1 μs)を、AD変換にはLTC1851(Linear Technology社製、12bit、1.25MSPS)を用いた。高速なDA、AD変換ICにはシリアルインタフェースを採用した物が多いが、マイクロプロセッサとの通信に数 μs かかってしまうためパラレルインタフェースの物を用いた。今回用いたAD変換器は完全な同時サンプリングは出来ないが、1 μs 以下の間隔でサンプリングできるため、皮膚の電気的時定数から考えて十分であると考えた。

インピーダンス計測のためには電圧と電流を測定する必要があるが、今回は後述するスイッチングICの仕様上、グラウンド側で電流計測を行うことが出来ない。このためFig. 5のような簡単な分圧回路を用い、高電圧部で電圧と電流を測定する。

電流はRc両端の微小な電位差によって計算されるため、電圧測定には高い精度が求められる。このため分圧抵抗Ra、Rb、Rd、Reには誤差0.1%の精密抵抗を

用い、さらに 12bit の AD 変換器を用いることで、結果として電流計測のダイナミックレンジを 9bit 確保している。

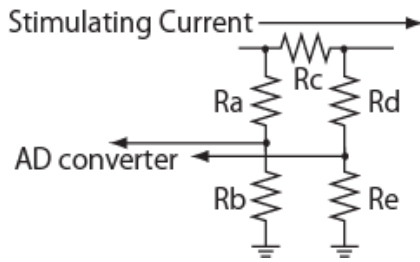


Fig. 5 Impedance Measurement

スイッチ部には HV507(Supertex 社製)を用いる。300V までの電圧を扱うことが出来、64ch の上下スイッチペアを内蔵し、スイッチの状態はシリアル入力のシフトレジスタによって制御できる。本 IC を複数個シリアル接続することでチャンネル数を増やすことも可能である。本来はピエゾアクチュエータやマイクロマシン等を一定電圧で駆動する IC であり、電気刺激に必要な機能が幾つか不足しているが、現在他に製品の選択肢がないため採用する。

PC とのインタフェースも実用上重要な設計要素である。マイコンを用いる実験環境では RS-232C 準拠のシリアル通信が最も簡便である。例えば PC から 100ch の刺激情報が 12bit で送られてくるとすれば、一回の刺激に 1200bit 必要となる。通信速度が標準的な 38.4kbps とすれば、一回の刺激情報の通信には約 30ms 必要となる。つまり圧縮を行わない場合、高々 30Hz 程度の刺激しか出来なくなってしまう。これは触覚提示装置としては大問題である。

そこでシリアル通信の速度を上げ、さらに安定に通信を行うため外部クロックによる通信を行う。外部発振子として EXO3(京セラキンセキ製、14.7456MHz)を用いる。この発振子は外部入力によって出力周波数を切り替えることが出来る。現在のところ 115.2kbps の通信が安定に実現されており、PC 側のシリアルポートを高速対応にすることで約 1Mbps の通信も可能である。

3. 結論

本稿では皮膚インピーダンス情報のフィードバック

による電気触覚ディスプレイの安定化という、従来も数多く提案されている手法について論じた。従来手法では刺激前のパルスによって測定した後、刺激パルス自体はフィードフォワードで与える。しかしこの方法では、刺激中の急激なインピーダンス変化に対応できず、しかもそのような状況は確率的に無視できない。

このことから本稿では、刺激パルス中でフィードバックを行う真のリアルタイム制御を行うことを提案し、そのためのシステム構成について述べた。電気刺激のパルス幅は 100 μ s 程度であるため、リアルタイムフィードバックを実現するには計測から制御までを数 μ s で終わらせる必要がある。このためマイクロプロセッサ、DA および AD 変換部を全て見直した。

本稿執筆段階では構成要素それぞれの基本性能が確認されているが、フィードバックループを作って実用的な電気触覚ディスプレイとして評価するには至っていない。今後順次進める予定である。

参考文献

- [1] 梶本, 管野, 舘: 日常的装具としての電気触覚ディスプレイ, 計測と制御 (計測自動制御学会誌), Vol.47, No.7, 2008.
- [2] 梶本, 舘: 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, 第 20 回生体・生理工学シンポジウム予稿集, 2005.
- [3] Collins C. C., "Tactile Television: Mechanical Electrical Image Projection," IEEE Trans. Man-Machine System, MMS-11, pp.65-71, 1970.
- [4] Tachi S., Tanie K., Komiyama K., Abe M., "Electrocutaneous Communication in a Guide Dog Robot (MELDOG)," IEEE Trans. Biomedical Engineering, BME-32, no.7, pp.461-469, 1985.
- [5] 渡辺, 渡辺, 大庭, 二見, 星宮, 半田: 皮膚電気刺激による受容感覚の安定化に関する基礎的検討, 信学技報 MBE Vol.98, pp.33-40, 1998.
- [6] 高橋, 黒木, 新居, 川上, 舘: タッチパネルのための環境型電気触覚ディスプレイ, ROBOMECH2009, 1P1-G05, 2009.