



静電気力を用いた多層電極型触覚ディスプレイ

Multi-Layer Electrode Haptic Display Using Electrostatic Force

佐々木洋哉, 熊野照久

Hiroya SASAKI, Teruhisa KUMANO

明治大学大学院 理工学研究科 (〒214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1, sst@mics.meiji.ac.jp)

概要: 本研究は、電気触覚ディスプレイにおいて、電極の多層化による触覚提示の表現力向上を目的とする。従来のディスプレイは、主に XY 平面上に配置された電極によって指先に電圧を印加し、触覚を提示していた。しかし、この方式では表現できる触覚の種類に限界があり、複雑な触覚提示には課題が残る。そこで、従来の電極配置に加え、Z 軸方向に電極を積層することで複数の電界を独立に制御可能とし、より複雑かつ多様な触覚表現を目指す。本稿では、実機での実験に向けた、交流電圧出力回路の動作シミュレーション結果について報告する。

キーワード: 電気触覚ディスプレイ, 触覚, 触覚デバイス

1. はじめに

コンピュータの性能が向上し、デバイスを通して伝達できる情報はよりリアリティを増している。例えば、VR ゴーグルなどはすでに実用化されており、視覚、聴覚情報によって、まるで自分が本当に映像の中に存在しているような感覚を得ることができる。

しかし、触覚提示の手法に関してはまだ研究段階のものも多く、一般的に普及しているものは、単にデバイスを振動させるものが多い。これらは、視覚や聴覚情報の伝達を補助することはできるが、「触覚情報を伝達する」レベルの触覚表現には至っていない。よって触覚提示における表現力の向上は、VR 分野の発展において重要な要素であると考えられる。

様々な触覚提示手法が研究されているが、電気触覚ディスプレイは、指と電極との間に発生する静電吸着力を用いて摩擦力を変調させることで触覚提示を行う。ディスプレイは電極と絶縁膜があれば構成でき、透明性を保ったままの触覚提示が可能である。よって、既存のデバイスに備わっている画面との併用も期待でき、視覚、触覚、聴覚を複合した情報伝達の実現に繋がると考えられる[1]。

電気触覚ディスプレイでは、印加する電圧の波形や周波数によって、表現できる触覚が変化することが報告されている[2]。また、指を持ち上げるタイミングでの電気刺激によって、粘着感を提示する手法も提案されている[3]。

本研究では、ディスプレイに対して垂直方向に複数の電極を積層し、複数の波形や周波数、異なる印加タイミングを持つ電圧を同時に印加することで、繊細な触り心地の変化や、複雑な物体の表現などが可能になると考えている。

上記の研究における実機実験のため、感電時の安全に配慮した電圧出力回路を設計し、シミュレーションによる動作確認を行った。本稿では、設計した回路の説明と、シミュレーションの結果について報告する。

本研究は、明治大学理工学部人を対象とした実験研究に関する倫理委員会からの承認を受けている。

2. 電圧出力回路

2.1 参考にした回路の概要

設計した回路の大部分は、図 1 に示す、参考文献[4]の「電圧-電流変換部」に記載の回路を参考としている。

この回路は入力電圧信号を電流に変換する回路と、電圧を供給する電流ミラー回路から構成されている。まず、オペアンプの V+ 入力に電圧 V_{in} が加わる。オペアンプから出力される電圧によって FETQ1 に電流 I_1 が流れ、これにより抵抗 R_1 に電圧が発生する。この電圧がオペアンプの V- 入力に加えられることにより、仮想接地の原理から V+ と V- が一致する。この時点で FET を通過する電流は、 V_{in}/R_1 となり、入力電圧が電流に変換される。電流ミラー部は次のように働く。PNP トランジスタ Q2, Q3 のベースが接続されていることから、これらのエミッタ電圧も等しくなる必要がある。このため、電流ミラーの左右を流れる電流と抵抗値の間には、 $I_2 R_2 = I_3 R_3$ の関係が成立する。つまり、 R_2 と R_3 の逆比によって電流を増幅できる[4]。

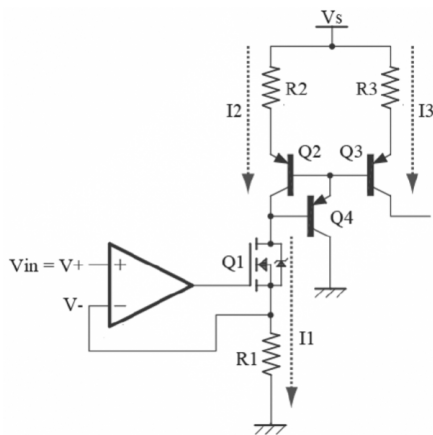


図 1: 電圧-電流変換部

[3] 梶本 裕之 ; 「電気触覚ディスプレイ」より引用

2.2 設計した電圧出力回路

図 2 に示す回路が、設計した電圧出力回路である。図 1 の回路は電流を増幅し出力しているのに対し、本回路ではこれを電流の微小化に用い、電圧出力とした。設計には回路シミュレータ LTspice を用いている。

交流電圧 V_{ac} を入力電圧とする。 V_{ac}/R_2 に変換された交流電流がトランジスタ Q_2 のコレクタ電流として流れ、抵抗 R_3 で電圧降下が発生する。よって適切な R_3 の値を選べば、 Q_2 のエミッタ電圧は、 $0V$ から最大 V_{dc} まで、 V_{ac} に合わせて時間変化することになる。 Q_2 、 Q_3 のエミッタ電圧は等しくなるから、 Q_3 のエミッタ部に出力を設けることで、最大 V_{dc} となった交流電圧を取り出すことができる。また、抵抗 R_5 の値を R_3 に比べ大きな値にすることで、感電時に流れる電流を微小にすることができる。

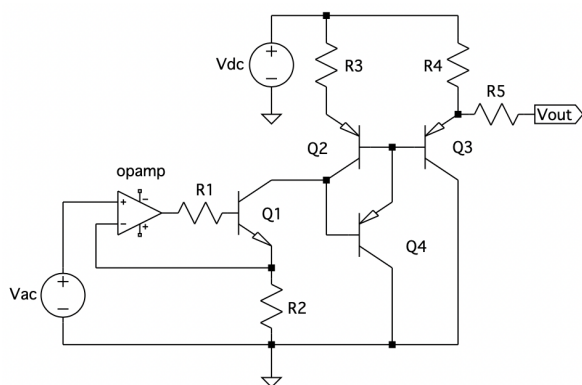


図 2: 電圧出力回路

3. シミュレーションモデル

3.1 回路のシミュレーションモデル

シミュレーションには図 3 に示す回路を用いた。これは、図 2 に示した電圧出力回路を二つ繋げたもので、多層電極への印加を考慮して出力を複数にしている。同構成を追加することで、出力数を増やすことも可能である。

シミュレーション時の各入力値は表 1 のようにした。

3.2 人体のシミュレーションモデル

感電時の安全性を確認するため、図 4 に示す人体の等価回路を用いてシミュレーションを行った。人体において、皮膚抵抗は 800Ω から $10k\Omega$ 程度であるとされている。一方、人体内部の抵抗はほぼ一定で、約 500Ω である[5]。

シミュレーションでは最も低い皮膚抵抗 800Ω を想定し、電流が体内に入る時と出る時で二度皮膚を通過すると考えた。また、指と電極のモデル化については短絡とした。

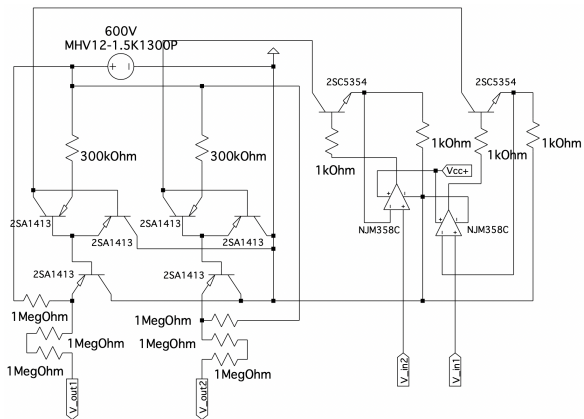


図 3: シミュレーションモデル

表 1: 入力電圧

V in1	正弦波交流, 振幅 1V, 周波数 100Hz
V in2	矩形波, 振幅 1V, 周波数 500Hz
Vcc+	直流, 15V

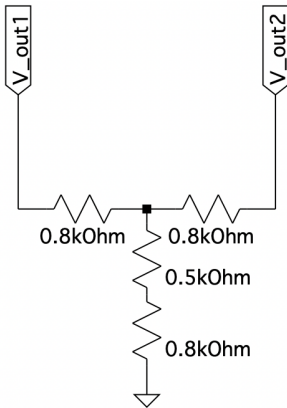


図 4: 感電時の人体モデル

4. シミュレーション結果

4.1 回路の出力電圧

本回路の出力電圧を図 5 に示す. 出力は, 図 3 における V_{out1} および V_{out2} 端子の電圧とした.

結果から, 同時に複数の波形, 周波数の電圧を, 最大約 600V で出力できることが確認できた.

過去の研究では 200V 程の電圧でも触覚を提示できているため, 表層部の電極を用いる場合には 600V の出力は十分だといえる[5].

今回, 絶縁時の電極と指の等価回路を用いたシミュレーションは行っていないが, 実際に多層電極で使用する場合, 二層目以降の電極では, 指との距離が離れることによる刺激の低下が予測される. しかし, 主な触覚提示には一層目の電極を用い, 二層目以降は刺激の補助や変化のために用いるため, 触覚表現の多様化には効果があると考えている.

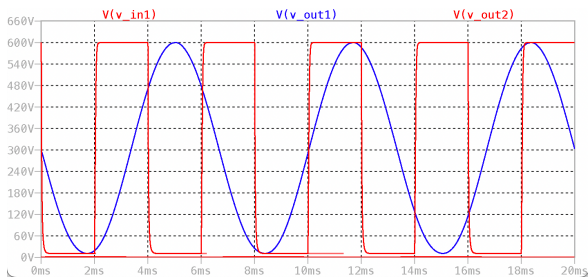


図 5: 回路の出力電圧

4.2 感電時の出力

感電時, すなわち指と電極が直接触れ, 短絡してしまったときの出力電圧を図 6 に, 出力電流を図 7 に示す.

結果から, 二つの出力が合成され, 指に加わる電圧は出力インピーダンスによる電圧降下により最大約 800mV と低く, 出力電流も同様の波形を示し, 450 μ A 以下に抑えることができている.

以上から, シミュレーションでは感電時の安全性をほぼ確認できたと言える[6].

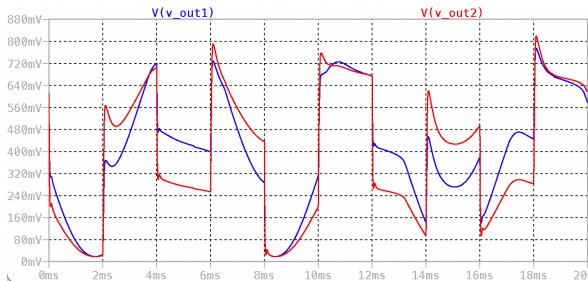


図 6: 感電時の出力電圧

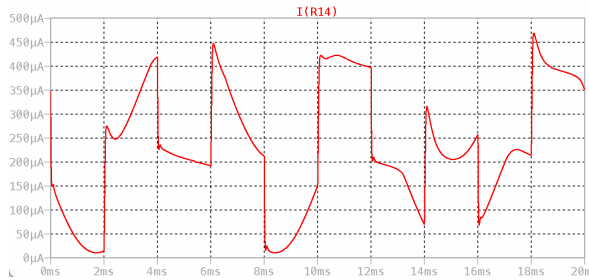


図 7: 感電時の出力電流

5. 結論と今後の方針

シミュレーション結果から, 安全性を保ちながら, 複数の種類の電圧を同時に出力できることが確認できた. よって, 電極を多層化することで複数種の電圧を指先に同時に印加すれば, より多様で複雑な触覚表現が期待できる.

今後の方針として, 実機実験によるシミュレーションの妥当性の確認, 多層電極における触覚の調査などが挙げられる.

参考文献

- [1] 山本晃生: 静電気力による映像ディスプレイ表面での触覚提示, 日本 VR 学会ハプティクス研究会, 「触覚技術の基礎と応用」 Vol. 64, pp. 145-149, 2020.
- [2] 武井冠汰, 嵯峨智: 静電気力を用いた触覚ディスプレイによる柔軟なテクスチャ感表現の提案, 第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 3B3-5, 2022.
- [3] 坂本泰清, 祖父江迪瑠, 牛山奎吾, 溝口泉, 梶本裕之: 電気触覚ディスプレイによる粘着感の提示, 第 29 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2C2-12, 2024.
- [4] 梶本裕之: 電気触覚ディスプレイ, 触覚認識メカニズムと応用技術, 第 3 章, 2010.
- [5] 富田洋文: 静電気力を用いたインタラクティブ視触覚ディスプレイに関する研究, 宇都宮大学工学研究科システム創成工学専攻, pp. 19-22, 2023
- [6] 社団法人日本船舶電装協会: 電装作業安全衛生ハンドブック, 日本財団図書館, 第 4 章-4.1.2, 1999.