

静電気力を用いた触覚ディスプレイにおける知覚強度の評価

Magnitude Estimation of Tactile Sensation on Electrostatic Tactile Display

○ 富田 洋文 (筑波大) 嵯峨 智 (熊本大)
高橋 伸 (筑波大) 梶本 裕之 (電通大)

Hirobumi TOMITA, University of Tsukuba, tomita@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

Satoshi SAGA, Kumamoto University

Shin TAKAHASHI, University of Tsukuba

Hiroyuki KAJIMOTO, The University of Electro-Communications

As a method of tactile display on the touchscreen, electrostatic tactile displays have been developed. We held evaluation experiments of the magnitude of tactile sensation using an electrostatic tactile display. From the result, we proposed a model to predict the magnitude of tactile sensation from the results of simple input waveform.

Key Words: Tactile display, Electrostatic, Magnitude of tactile sensation

1 緒言

スマートフォンやタブレットをはじめとし、タッチスクリーンによるインタフェースは世界的にも多く使われている。多くのユーザが電子端末を選ぶ際にインタフェースとしてタッチスクリーンを選ぶことも多い。しかしながらこれらのタッチスクリーンはスクリーン自体の摩擦感以外でユーザに触覚を提示することは少ない。そのため現在の端末では視覚や聴覚の情報をやり取りすることは可能であるが触覚情報をスクリーンを通して伝えることはほとんどできない。ユーザに触覚的な反応を返すにはデバイス自体に触覚ディスプレイが必要となる。触覚ディスプレイとは、ヒトに対して重さや感触といった触覚体験をユーザに提示するものであり、このディスプレイには人間に備わる感覚受容器への刺激が必要不可欠である。

我々は触覚ディスプレイの研究の中で近年注目されている静電気力を用いた触覚フィードバックを発生させる手法 (Senseg, Inc., Bau, et al. [1]) に着目し、これを用いた触覚ディスプレイの提示手法を検討する。この静電気力を用いた手法は高電圧を出力できる装置、電極、そして絶縁膜のみで触覚提示を可能とする。これらは装置と接続された電極上に絶縁膜を貼り、電極に電圧を印加し絶縁膜上に指を置くことで誘電分極が発生する。この誘電分極により電極と指に吸引力が働く。装置から印加する入力電圧が変化することでこの吸引力も変化する。指が絶縁膜上をなぞることによって吸引力によって生成される摩擦力が働くが、この摩擦力が一定であると指は装置による触覚を知覚できない。入力電圧値を変化させるとそれに伴って摩擦力も変化し、その力の変化によって指は触覚を知覚することができる。スクリーンのような平面上で触覚刺激を容易に提示することが可能となる。また、ITO電極という透明な電極と、透明な絶縁膜を用いることでスクリーン画像を映しながら触覚を提示することが可能となるので、タブレットやスマートフォンにも応用できる。この手法を用いた研究はいくつか実施されている [1, 2, 3, 4, 5] が、触覚提示での入力信号に対する触覚の強さや感触といった触覚表現についての定量的なモデル化が行われていない。

そこで本研究では実験協力者を用いた心理物理実験を通して本手法における触覚刺激の評価実験を基に、入力信号と触覚刺激の間の関係を調査し、最終的にはこれらの触覚刺激をモデル化することを研究目的とする。本論文では入力信号に対してヒトの指がどれほど強く感じるのかを示す知覚強度に関する調査を行い実験結果から入力信号と触覚刺激の間の関係について議論した。

2 触覚ディスプレイ装置と知覚強度の評価手法

2.1 静電気力を用いた触覚ディスプレイ

静電気力を用いた触覚ディスプレイは高電圧発生装置、電極、そして絶縁膜のみの構成で触覚を提示することが可能である。電圧を印加していない電極上に絶縁膜を張り付け、その上に指を置く。この状態で指を動かした場合、指は絶縁膜自体の表面の摩擦力の触覚を感じる。電極に高電圧を印加した場合、絶縁膜の表裏上で誘電分極により電荷が溜まる。この現象により、指と電極間にわずかな吸引力が発生する。この吸引力は絶縁膜に対して垂直方向に力が働く。しかし、この吸引力は指が絶縁膜に対して垂直方向に押し付ける力より微弱なため、この吸引力を指で知覚することができないが、この状態で指を動かした場合、指には入力電圧がない場合での摩擦力に吸引力による摩擦力が加わる。一定の電圧をかけた場合、指にかかる力も一定なため、指はわずかな力が加わったことに知覚することができない。そこで入力電圧を変化させることで加わる摩擦力を変化させることで指は何かしらの力を知覚することができる。

先行研究では、どのような装置を用いれば触覚を知覚することができるのか、どのような入力波形を電極に印加すればテクスチャ感が出せるのか、静電気力を用いた触覚ディスプレイはこれらの開発及び調査する研究がこれまでにされてきた [1, 2, 3, 4, 5]。しかし、静電気力を用いた触覚ディスプレイにおける触覚がどれほど強く感じるのかを示す知覚強度についてのモデル化が行われていない。そこで、我々は本手法を用いて知覚強度を評価するために実験協力者を募り心理物理実験を実施した。

2.2 知覚強度の評価実験

知覚強度を評価するには、ある程度実験協力者ごとで尺度の差がないようにしなければならない。そこでマグニチュード推定法 [6] を用いて上下限の無い知覚強度の評価を行い、正規化することですべての実験協力者で同じ尺度で知覚強度を評価できる。なお、本論文での心理物理実験は全て筑波大学の研究倫理規定に則った実験 (承認番号 2016R151) である。

マグニチュード推定法とは1つの基準対象物と1つの評価対象物を用いて評価することである。今回の実験では、触覚提示装置を2つ用意し、片方の装置によって実験協力者に同じ触覚を提示し続け、もう片方の装置で提示する触覚を変えていく。そして同じ触覚を提示し続けている装置側の触覚の知覚強度を1.0とし、もう片方の装置から提示される触覚の知覚強度が何倍なのかを実験協力者に自由な数値で回答させた。例えば、基準となる触覚に比べて評価する触覚が弱ければ1.0未満の数字を、逆に触覚が強ければ1.0より大きな数字で何倍かを答えてもらう。また評価する方の触覚を感じない場合は0.0と答えてもらう。しかし、評価

する場合、実験協力者によって答える数字の最大値が変わる。そこでその最大値で評価した値全体を割ることで実験協力者ごとの知覚強度の値が最小の 0.0 から最大の 1.0 までの範囲で正規化される。

我々はこのマグニチュード推定法を用いた知覚強度の評価実験を実施した。実験協力者は基準となる触覚を知覚してもらい、もう片方の評価する触覚の知覚強度を答えてもらう。提示装置に触れる際、実験協力者には利き腕に関係なく右手の人差し指の腹の部分で触覚を提示する部分に触れてもらい評価を行ってもらった。実験で使用する基準となる触覚は、正弦波 300 Hz を入力信号とした触覚の知覚強度とした。評価する触覚の入力波形を用意し、それぞれ 10 Hz から 800 Hz までの 20 個の周波数の波形を用意する。今回の評価実験ではこれらの評価用の入力波形をランダムに提示し評価を行ってもらった。

3 基本波形を入力信号とした知覚強度の評価実験

3.1 入力波形

本手法における触覚提示の知覚強度の評価実験を行うため、評価実験に使用する評価用の入力信号を正弦波、矩形波、鋸歯状波、そしてデルタ関数といった 4 種類の基本波形にした。これらの波形を用いて装置から指に触覚を提示し、実験協力者がどれほど強く感じ取れるかを評価してもらう。この心理物理実験では、10 名の実験協力者を募った。実験協力者は平均年齢が 22 歳 (21 歳から 23 歳) の大学院生である。また実験協力者のうち女性は 1 名である。

3.2 実験結果

各波形での周波数ごとの知覚強度の評価結果を Fig. 1 に示す。このグラフは横軸が周波数、縦軸が正規化された知覚強度を示す。グラフの各点の知覚強度は 10 名の結果を平均したものである。実験の結果、すべての波形を比較すると 100 Hz あたりを境にグラフの特徴が分かれた。

入力信号が 100 Hz より高い知覚強度のグラフは、4 つの波形が同じような知覚強度のグラフとなり、さらに周波数が高くなるほどすべて入力信号で知覚強度が低下していく傾向が見られた。これらの要因として、人間が持つ皮膚の機械的なローパスフィルタによるものと、指にある受容器の影響と考えられる。入力波形が高周波の場合、人間の皮膚の機械的なローパスフィルタによって波形ごとの触覚の知覚に差が生まれにくくなると考えられる。そのため今回の評価実験の結果では比較的高い周波数においてどの波形でも同じような知覚強度になると考えられる。またどの波形も高周波になるほど知覚強度が下がる原因として、指にある触覚受容器の影響と考えられる。先行研究では振動する物体に指を乗せ、振動の周波数ごとでどの程度の振幅で触覚受容器が反応するのかを調査したものが [7]。その結果として、どの受容器も一番知覚できる周波数が存在し、振動周波数がその周波数より高くなるほど知覚強度が落ちていくことが確認された。パチニ小体という受容器は 200 Hz の振動で最も知覚しやすく、それよりも高い周波数では知覚強度が低下する傾向がみられる。このこと

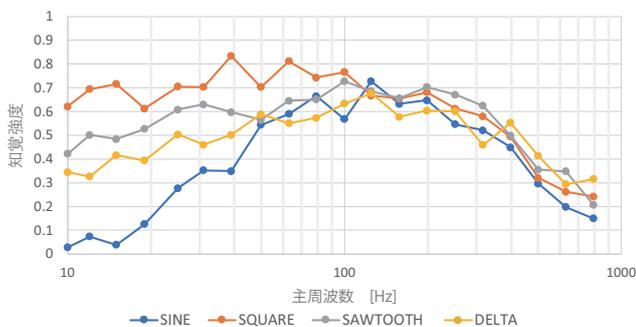


Fig.1 基本波形を入力信号とした場合での周波数に対する知覚強度のグラフ

から今回のグラフでも高い周波数では知覚強度が低下したと考えられる。

入力信号が 100 Hz より低い知覚強度のグラフは、4 つの波形で知覚強度に違いが生まれ、矩形波を入力信号とした場合での知覚強度が最も強く、その次に鋸歯状波、デルタ関数、正弦波の順に知覚強度に違いが見られた。我々はこの要因が入力信号の波形が持つ周波数成分にあると考えた。矩形波や鋸歯状波には、複数の周波数を持つ正弦波が含まれている。それらの含まれた正弦波の成分が、人間が持つ触覚を知覚する受容器を刺激していると考えられる。

どの波形においても振幅や周波数が違う正弦波の組み合わせで表せられ、周波数分析することで波形に含まれている正弦波の周波数とその振幅強度を求めることができる。例えば一つの周波数を持つ正弦波であれば、周波数は 1 つであり、その強度も最大値である。また、矩形波であれば奇数倍の周波数を持ち、それぞれの強度は違う。このように波形ごとで周波数成分が異なる。我々はこの周波数成分に含まれている波形が人間の触覚受容器を刺激しているのではと考える。周波数が 10 Hz の矩形波であっても、矩形波の中には 30 Hz の正弦波や 200 Hz に近い正弦波を含んでいる。こういった成分が触覚受容器を刺激すると考えられる。

4 周波数成分に着目した波形を入力信号とした知覚強度の評価

4.1 入力波形

ここで周波数成分に着目した波形を入力信号とし、基本波形を入力信号とした場合と同じ心理物理実験を実施した。入力信号は Fig. 3 に示す 8 つの波形を用意した。入力波形 1 は周波数成分の数が 2 つでどちらも振幅が同じ波形である。入力波形 2 と入力波形 3 は入力波形 1 と同じで周波数成分の数が 2 つであるが、2 つの成分の振幅に違いがある。入力波形 4 は周波数成分の数を 3 つにし、これらの振幅はすべて同じである。入力波形 5 と入力波形 6 は入力波形 4 と同じ周波数成分の数が 3 つであるが、3 つの成分の振幅に違いがある。入力波形 7 と入力波形 8 は周波数成分の数が 5 つであり、周波数の奇数倍の正弦波が含まれている。

入力波形 1 と入力波形 4 を比べることで、周波数成分が増えることでどのように知覚強度のグラフがどのように変化するのかを調査する。また、入力波形 1, 2, 3 または入力波形 4, 5, 6 を比べることで、周波数成分ごとで振幅強度に差が表れることでどのように知覚強度のグラフが変化するのかを調査する。入力波形 7 と入力波形 8 の知覚強度を評価することで入力波形 1 から 6 までどのように違いが見られるのかを調査する。

これらの入力信号を評価対象とし、4 名の実験協力者に評価を行ってもらった。

4.2 実験結果

各波形での周波数ごとの知覚強度の評価結果を Fig. 2 に示す。このグラフは横軸が周波数、縦軸が正規化された知覚強度を示す。グラフの各点の知覚強度は 4 名の結果を平均したものである。

今回の結果から、入力波形 1 から入力波形 6 までの入力信号は似たような知覚強度のグラフとなった。しかしこれら 6 つの入力信号でも比較的低い周波数帯では、入力信号ごとに知覚強度の

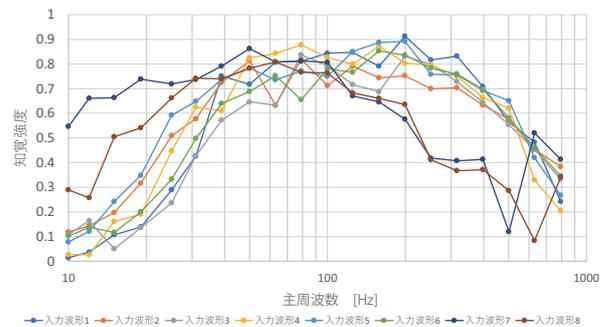


Fig.2 周波数成分に着目した波形を入力信号とした場合での周波数に対する知覚強度のグラフ

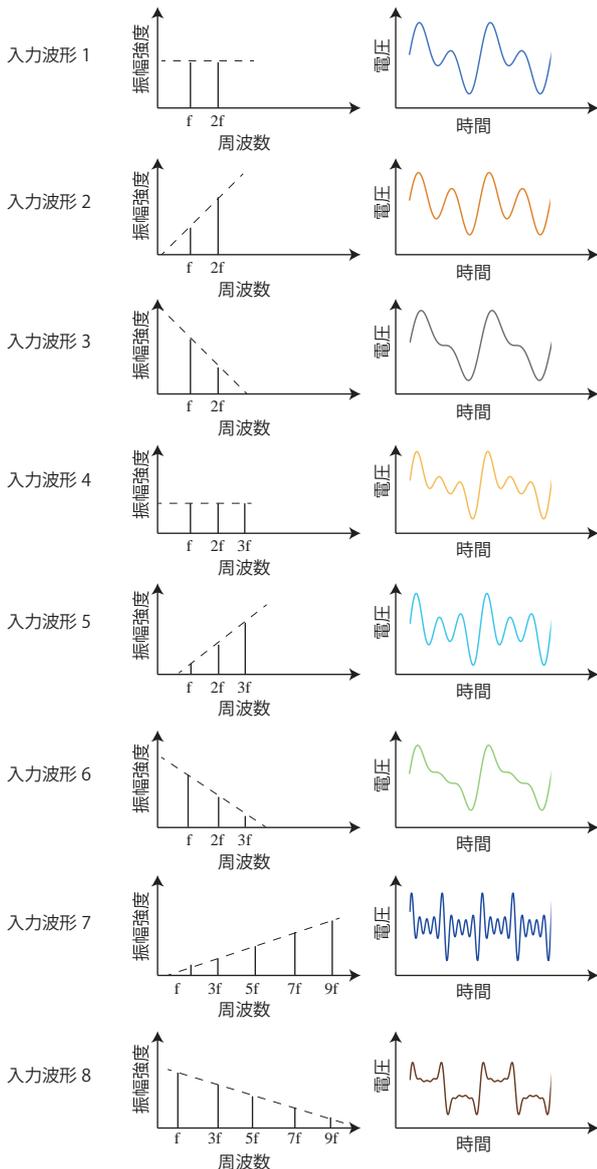


Fig.3 心理物理実験で評価する入力波形

グラフに僅かな差が表れた。入力波形7と入力波形8では他の6つの入力信号と比べ明らかな知覚強度のグラフの傾向に違いが見られた。100 Hzより低い周波数帯では入力波形7と入力波形8が他の6つの入力信号より高い知覚強度で評価され、100 Hzを超えると他の6つの入力信号より低い知覚強度となった。

5 近似関数を用いた実験結果の考察

これまで12種類の入力信号による知覚強度の評価をするため心理物理実験を実施した。今回の実験結果から以下のような共通点が見られる。

- すべての入力波形でグラフは上に凸のグラフである
- グラフの最高点の周波数は入力波形ごとで異なる
- 周波数が非常に高いと知覚強度は低下する

共通点から我々は実験結果で得られたグラフが片対数グラフにおけるガウス関数を基にした近似関数で置き換えることができると考える。ガウス関数の概形に近似することで、入力信号ごとの知覚強度のグラフ概形の特徴を比較した。ガウス関数を基にした近似関数 $G(f)$ を以下に示す。

$$G(f) = a + b \exp\left(-\frac{(\log_{10} f - \log_{10} c)^2}{d}\right) \quad (1)$$

Table 1 入力信号ごとの近似関数パラメータ

	a	b	c	d
正弦波	0	0.766	110	0.185
矩形波	0	0.784	47	0.775
鋸歯状波	0	0.696	77	0.688
デルタ関数	0.002	0.613	98	0.669
入力波形 1	0	0.928	142	0.280
入力波形 2	0	0.815	126	0.412
入力波形 3	0	0.827	150	0.312
入力波形 4	0	0.922	123	0.288
入力波形 5	0	0.889	124	0.377
入力波形 6	0	0.850	147	0.342
入力波形 7	0.01	0.790	45	0.661
入力波形 8	0.01	0.792	65	0.344

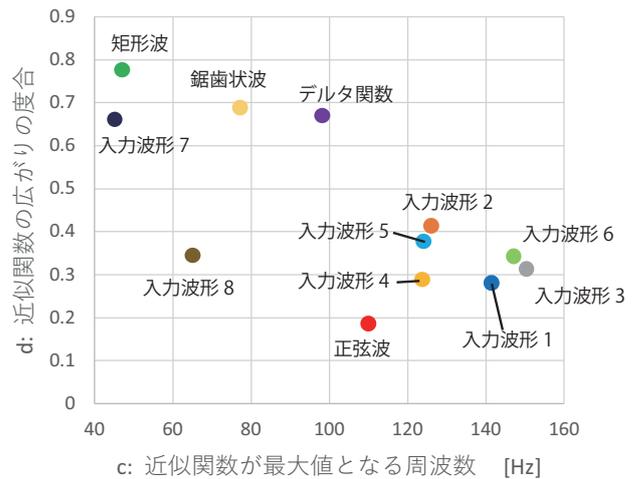


Fig.4 入力信号ごとの近似関数の最大値となる周波数 (c) に対する広がり具合 (d)

上式に示したパラメータ a, b, c, d において、 a は近似関数のオフセット量を示し、 b は近似関数の最大値、 c は近似関数が最大となる周波数、そして d は近似関数の広がり具合を示す。12種類の入力信号すべての知覚強度のグラフを近似関数に置き換えた場合のそれぞれのパラメータを Table 1 に示す。

近似関数のパラメータの1つであるオフセット a はほとんどの入力波形で 0 に近い値を示し、オフセット a で入力波形ごとの違いは見られなかった。

近似関数の最大値を示す b は基本的な波形と入力波形7と入力波形8で 0.6 から 0.8 の間の数値だが、入力波形1から入力波形6まではどれも 0.8 以上と高い数値となった。この数値が高いほど、実験協力が者が回答した一番強く感じる周波数が近いことを示す。今回の結果では入力波形1と入力波形4が最も高かった。この2つの入力波形は波形に含まれる周波数成分の数が少なく、さらに振幅強度が同じという特徴がある。逆に最も b が小さかったのはデルタ関数であった。デルタ関数の周波数成分の数は多く、かつ振幅強度がほぼ等しいという特徴がある。また、周波数成分を5つ含んでいる入力波形7と入力波形8でも、 b の値は入力波形1から入力波形6に比べて低かった。今回の結果から周波数成分の数が増えるほど近似関数の最大値 b が減る、つまり実験協力が者が最も強く感じる周波数の分散が大きくなるという仮説が得られる。しかし、基本波形を入力信号とした実験の実験協力が者の人数に比べ周波数成分に着目した波形を入力信号とした実験の実験協力が者の人数が少なく統計的に十分な人数とは言えないため、今後も実験協力が者の人数を増やし同じ実験を行わなければならない。

Fig. 4 は Table 1 を基に横軸を近似関数が最大値となる周波数 c に、縦軸を近似関数の広がり具合を表す d にプロットした図である。近似関数が最大値となる周波数 c は Fig. 4 のように

周波数成分が多い波形と周波数成分が少ない波形で 100 Hz を境になるように分布が分かれた。周波数成分の振幅強度の傾向が似ている入力波形 1 と入力波形 4, 入力波形 2 と入力波形 5, 入力波形 3 と入力波形 6 で比べても, 周波数成分が多いほうが c の値が低くなった。さらに周波数成分の振幅強度の傾向が対称的な入力波形 2 と入力波形 3, 入力波形 5 と入力波形 6, 入力波形 7 と入力波形 8 で比べても, 周波数成分の振幅強度の傾向が右上がりのほうが c の値が低くなった。

近似関数の広がり具合を示す d はほとんどの入力信号で 0.4 以下となった。周波数成分の数が少ない入力波形 1 から入力波形 6, そして正弦波はすべて 0.4 以下となった。しかし, 周波数成分が比較的多い入力波形 8 も 0.4 以下となった。ここで周波数成分の振幅強度の傾向が対称的な入力波形 2 と入力波形 3, 入力波形 5 と入力波形 6, 入力波形 7 と入力波形 8 で比べると, 周波数成分の振幅強度の傾向が右上がりのほうが d の値が大きくなった。

知覚強度のグラフをガウス関数を基にした近似関数に置き換えた結果, 以下のような仮説が立てられる。

- 波形に含まれる周波数成分の数が増えると, 知覚強度が最も高い周波数帯の分散が大きくなる
- 波形に含まれる周波数成分の振幅強度の傾向によって, 知覚強度が最も高い周波数が変化する

しかし, 周波数成分に着目した波形における心理物理実験では実験協力者の人数が少ないためこの仮説が棄却される可能性もある。この仮説が立てられれば, 本論文の調査結果から簡易的な周波数成分で構成される波形であれば, それを入力信号とした場合の知覚強度の予想を立てることが可能となる。例えば周波数成分の数が 4 つで振幅が均一であれば Table 1 や Fig. 4 から近似関数パラメータを算出することができる。

今後は実験協力者を増やし心理物理実験を実施することで, 上記の仮説通りの結果となるかを検証する。また, 入力信号の波形のパターンを増やし, さらなる知覚強度のグラフの傾向を見出すことで, 研究目的である知覚強度のより精度の高いモデル化を検討する。

6 結言

本稿において我々の触覚提示装置における提示触覚の入力波形と人間が感じる知覚強度について心理物理実験を通して調査した。知覚強度は 2 つの触覚を比較するマグニチュード推定法を用いて評価した。はじめに正弦波や矩形波といった基本波形を入力信号とし, 実験協力者に評価してもらったところ, 入力信号ごとに知覚強度のグラフの傾向が変化した。我々はこの要因を入力信号の波形に含まれる周波数成分に依存すると考え, 追実験として周波数成分に着目した波形を入力信号とし再度実験協力者に評価してもらった。本論文では評価結果をガウス関数を基にした近似関数に置き換え, その関数のパラメータを入力信号ごとに比較することで知覚強度のグラフの傾向の仮説をたてた。その仮説により, 簡易的な周波数成分で構成される波形であれば, それを入力信号とした場合の知覚強度のグラフを予測することが可能となる。今後は実験協力者, および入力信号の波形パターンを増やすことで本論文でたてた仮説の検証を行い, 最終的には知覚強度のより精度の高いモデル化を目指す。

参考文献

- [1] Olivier Bau, Ivan Poupyrev, Ali Israr, and Chris Harrison. Testatouch: Electrovibration for touch surfaces. In *Proceedings of the 23rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '10, pp. 283–292, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [2] Edward Mallinckrodt, AL Hughes, and William Sleator Jr. Perception by the skin of electrically induced vibrations. *Science*, 1953.
- [3] Robert M. Strong and Donald E. Troxel. An electrotactile display. *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, Vol. 11, No. 1, pp. 72–79, 1970.
- [4] Eric Vezzoli, Michel Amberg, Frédéric Giraud, and Betty Lemaire-Semail. Electrovibration modeling analysis. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 369–376. Springer, 2014.
- [5] Yasemin Vardar, Burak Güçlü, and Cagatay Basdogan. Effect of waveform in haptic perception of electrovibration on touchscreens. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 190–203. Springer, 2016.
- [6] S Stevens Stanley. *Psychophysics: Introduction to its perceptual, neural and social prospects*. New York, Wiley, 1975.
- [7] A. Gescheider, Stanley J. Bolanowski, and Kathleen R. Hardick. The frequency selectivity of information-processing channels in the tactile sensory system. *Somatosensory & Motor Research*, Vol. 18, No. 3, pp. 191–201, 2001.