

手の接近及び多様な触覚刺激を識別する 柔軟な触覚センサの開発

田中 遼祐¹ 岡 夏樹² 田中 一晶¹

概要：人と触れ合うことは相手との親しみを強めたり感情を伝えたり様々な効果があることが知られている。ロボットも人との触れ合いにおいて適切な反応を返すことができれば、それらの効果が得られる可能性がある。そこで本研究では、導電性シリコンゴムを電極として使用した薄く柔軟な静電容量方式の触覚センサを開発した。このセンサの表面に人肌の柔軟性を持つ皮膚素材を貼り付け、様々な触覚刺激における静電容量の時系列データを収集し、LSTM (Long short-term memory) を用いて刺激の識別モデルを構築した。その結果、9つの状態の識別において85.1%の正答率が得られ、撫でる、叩く、くすぐる等の皮膚素材に直接触れる刺激だけでなく、手の接近/離反も高い精度で識別できることが示された。また、皮膚素材の表面を押す強弱についてもある程度の精度で識別することができ、人の手との接触においては圧力センサとしても機能する可能性が示された。

1. 緒言

人同士の身体接触（ソーシャルタッチ）は、相手に親近感を与えること [1] や相手に感情を伝えること [2], [3] 等の様々なポジティブな効果がある。それを人とロボットとのインタラクションに応用することで、ペットロボットや人型ロボット等のロボットと人との関係をより良いものにできる可能性がある。実際、ロボットが人の手に接触するインタラクションにおいて、ロボットに対する親近感が高まることが示されている [4]。また、離れた場所にいる人同士がロボットハンドを介して握手をするインタラクションにおいて、ロボットに対する親近感や近くに相手がいるような感覚を高まることが示されている [5], [6]。

これらの研究から、人とロボットとのインタラクションにおいても身体接触によってポジティブな効果が得られる可能性があるが、そのためには人からの身体接触に対して適切な反応を返せるように、ロボットにも人間のような触覚が必要となる。つまり、人間の皮膚のように多様な触覚刺激をセンシングし、識別できる必要がある。そのため、先行研究では、様々なロボット用の触覚センサが開発されてきた。例えば、ポリエチレンテレフタレート (PET) フィルムやポリジメチルシロキサン (PDMS) 等を素材として静電容量方式の触覚センサを開発されており、それぞれ独自の構造が提案されている [7], [8], [9]。しかしながら、

触覚センサ自体でロボットの表面を被覆してしまうと、身体接触における触感をデザインすることが困難になるという問題が生じる。例えば、ロボットハンドにおいては、人と触れ合っている触感を再現するためには人間の皮膚のような柔軟な素材（皮膚素材）で表面を被覆することが有効であることが知られている [5], [6]。したがって、人と触れ合うロボットのための触覚センサの要件として、次の3つが考えられる：ロボットの皮膚素材の下に配置しても、1) 触覚センサとして機能する、2) 触感を損ねない、3) 表面形状を可能な限り変化させない。先行研究で提案されている触覚センサは、1mm未達の厚みのものもあり [7], [8]、皮膚素材の下に組み込んでも形状の変化は少ないことが予想される。しかしながら、いずれのセンサも、センサ自体に触れることを想定して開発されており、ロボットの皮膚素材の下に組み込んでも有効に機能するかは検証されていない。また、柔軟性については、例えばPET素材のフィルムを使用したセンサ [7], [9] を組み込んだ場合、人間の皮膚よりも硬度が高く、皮膚素材が薄いと触感に違和感が生じる可能性がある。さらに、これらのセンサは高い分解能で接触位置を検知できるように設計されており、構造が緻密で容易に製作することは困難である。

そこで本研究では、容易に製作できる非常に単純な構造でありながら、人間の皮膚のような柔軟な素材の下に組み込んでも機能し、センサ自体が柔軟で厚さ1mm未達であることから、皮膚素材の触感を損ねない触覚センサを開発する。この目的のため、まず導電性と非導電性のシリコン

¹ 京都工芸繊維大学

² 宮崎産業経営大学

ゴムを用いて触覚センサの試作を行う。そして、その触覚センサにおいて「刺激なし」「接近」「接触」「撫でる」「叩く」「弾く」「くすぐる」「弱く押す」「強く押す」の9状態のデータを取得し、Long Short Term Memory (LSTM) ネットワークを用いて識別モデルを構築する。

2. 関連研究

2.1 既存の触覚センサに関する関連研究

先行研究では様々な種類の触覚センサが開発されており、静電容量方式 [7], [8], [9] や光学方式 [10], 電気抵抗方式 [11], [12], 圧電方式 [13] 等がある。特に人との身体接触を想定して開発された触覚センサにおいては、手の接近による電極間の静電容量変化を読み取る静電容量方式のものが多い。例えば、銅電極の層とシリコン素材の層からなる触覚センサが開発されている（分解能 8×8 : [7], 4×4 : [8][9]）。これらのセンサでは、柔軟なシリコン素材 (PDMS) が用いられているものの、それよりも固い PET 等のフィルムに銅電極を張り付けて電極層を構成しており、それによってセンサ全体の柔軟性は低下してしまう。また、電極層は非常に微細で構造が複雑であり、容易に製作できるとは言えない。

触覚刺激の力がセンサに加わった際に、電気抵抗方式は電気抵抗の変化を読み取り [12], 圧電方式は発生する電圧の変化を読み取る [13]。これらの方式では、電極自体の構造は多少単純化されるが、電極に1本ずつ配線が必要となり、分解能を高めようとすると配線が複雑化してしまうため分解能を高めにくいという問題がある。また、上述の静電容量方式の触覚センサと同様に電極層が固くセンサ全体の柔軟性は高いとは言えない。

上述の触覚センサは、センサ自体に手や物体が直接触れることを想定して設計されている。そのため、ロボットに取り付ける場合には、ロボットの表面をセンサで覆うことになり触覚はそのセンサそのものになってしまう。人肌のような皮膚素材の下に配置しても触覚センサとして有効に機能するかどうかは不明である。これに対し、光学方式はセンサ表面の変形をカメラ等で計測するものであるため、ロボットの表面の素材が限定されにくい可能性がある。しかしながら、計測のためのカメラやLED照明が必要であり、センサ自体が大型化してしまうという問題がある [10]。

本研究で開発したセンサは、表面に柔軟な皮膚素材を張り付けても触覚センサとして機能するのはもちろん、導電性のシリコンゴムを電極として使用し、0.5mmの薄さであるため、その触覚を大きく損ねることがない。また、単純な構造であるため、製作も用意である。

2.2 触覚刺激を識別する関連研究

触覚センサで取得した触覚刺激の種類の識別するために機械学習技術が有効であることが多数の研究で報告されて

いる。例えば、市販のマルチタッチ可能な圧力センサを用いて、平面上で、撫でる、ひっかく、つく、狭く押す、広く押すの5種類と、人間の腕の上で、つまむ、つかむの2種類の計7種類の触覚刺激を3次元量込み込みニューラルネットワークを用いて高い精度で識別できることが報告されている [14]。この先行研究ではセンサに直接触れて触覚刺激を与えており、柔軟な皮膚素材の下にセンサを組み込んでも同様のセンサや機械学習モデルが有効に機能するかは不明である。

触覚センサとしてコンタクトマイクロホンを使用し、振動から触覚刺激を識別する研究も行われている [15]。この先行研究では撫でる・軽く叩く・平手打ち・くすぐるの4種類の触覚刺激の振動を取得し、様々な機械学習技術で識別できることを示している。また、別の先行研究では、物体が接触した際に生じる音から、その物体の種類を識別する研究も行われている [16]。これは、物体の接触によって生じる音の音響特性を用いてサポートベクターマシン (SVM) で分類するものであり、指先、腹、関節およびペンなどの道具のいずれと接触したかを高い精度で識別できることを示している。

しかしながら、マイクロホンを用いて触覚刺激を識別する場合、柔軟な皮膚素材でロボットを被覆している場合には振動が伝わりにくく有効に働かない可能性が考えられる。また、ロボットが動くことによるノイズの影響を受けやすいという問題もある。

これらの研究では、人の手や物体が接触した状態を識別するモデルを構築しているが、ロボットの触覚センサとして活用する場合には、何も接触していない状態も識別する必要がある。特に静電容量式のセンサは人の手が接近するだけでも静電容量が変化するため、非接触の2つの状態（何の触覚刺激も与えられていない状態、手が接近している状態）と人の手がロボットの皮膚素材に触れている状態を識別できることが望ましいと考えられる。本研究では、開発した触覚センサによって「刺激なし」「接近」「接触」状態と、他の6つの触覚刺激を含む計9状態を識別できる LSTM モデルを構築し、その識別精度を評価する。

3. 触覚センサの試作

3.1 触覚センサの構造

本研究で試作した薄く柔軟で単純な構造の触覚センサ (図1) について説明する。黒色の部分が厚さ0.1mmの導電性シリコンゴムの電極であり、センサの表面と裏面に縦方向に5本、横方向に5本をそれぞれ配置している。そのため、試作したセンサの分解能は 5×5 である。各電極の正方形の部分の一辺は6mmであり、正方形部分同士の間隔は2mmである。この電極を厚さ0.2mmの透明な非導電性シリコンゴムにはめ込み、表面と裏面で電極が交差するように張り合わせている。その際、表面と裏面の電極が短

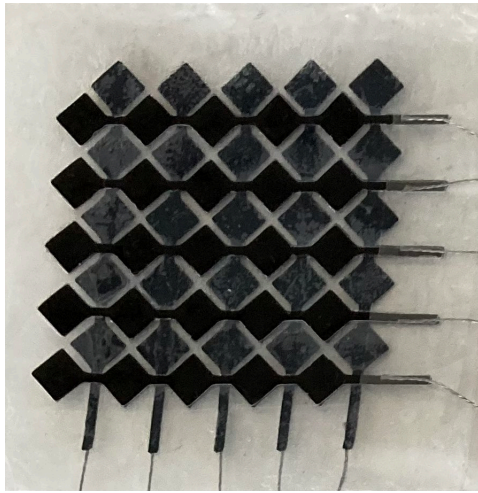


図 1 導電性 (黒色) と非導電性 (透明) のシリコンゴムでできた触覚センサ

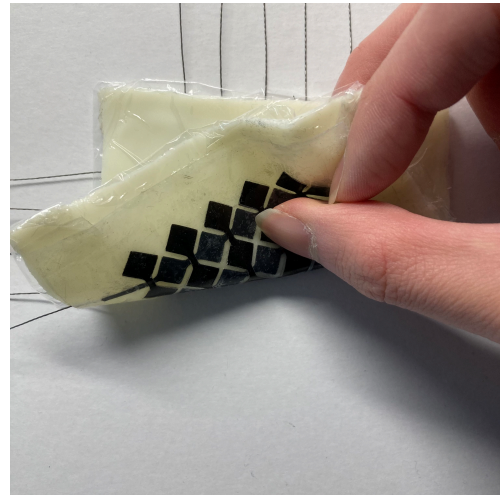


図 2 触覚センサの柔軟性

表 1 データセットのデータ数

状態	計測回数	学習データ	検証データ数	テストデータ数
刺激なし	68	613	317	70
接近	64	718	254	28
接触	59	682	219	101
撫でる	52	662	287	52
叩く	311	661	143	98
弾く	232	641	166	93
くすぐる	60	767	126	105
弱く押す	51	742	159	108
強く押す	54	815	75	119

絡しないように間に厚さ 0.05mm の透明な非導電性シリコンゴムを挟んでいる。これらの面をシリコンゴム用の接着剤で張り合わせた結果、試作したセンサの厚さは約 0.5mm となった。図 2 は試作したセンサを厚さ 2mm の皮膚素材であるウレタン樹脂製のシート (アスカー C 硬度 0) *1 に張り付けた状態を示しており、皮膚素材の変形に応じてセンサ自体も柔軟に変形している。

このセンサにおいて手の接触位置を検出する上で、静電容量方式の 1 つである相互容量方式を採用した。相互容量方式はスマートフォンのタッチスクリーンにも使用されており、複数の接触箇所を検出することが可能である。静電容量の計測には、静電容量タッチ評価ボード *2 を利用した。

4. 触覚刺激の識別モデルの構築・評価

4.1 触覚刺激のデータセット構築

試作した触覚センサを用いて「刺激なし」「接近」「接触」

*1 エクシール 超軟質ゲルシート :

<http://www.exseal.co.jp/creative/>

*2 renesas RX130 搭載静電容量タッチ評価システム :

<https://www.renesas.com/jp/ja/products/microcontrollers-microprocessors/rx-32-bit-performance-efficiency-mcus/rx130-capacitive-touch-capacitive-touch-evaluation-system-rx130>

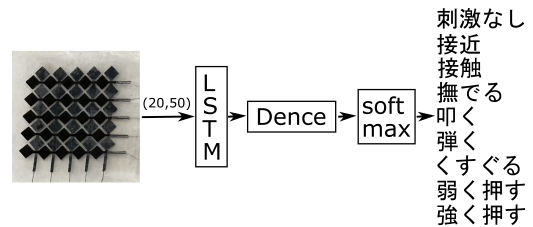


図 3 LSTM を用いた学習モデル

「撫でる」「叩く」「弾く」「くすぐる」「弱く押す」「強く押す」の 9 つの状態を識別する LSTM モデルを構築する。そのため、まず 9 つの状態における静電容量をセンサで収集した。センサの表面には 3.1 節で述べた通り厚さ 2mm の皮膚素材を張り付けており、それに対して実験者が次の 9 状態において静電容量を計測した。

刺激なし 皮膚素材に触らず放置する状態。

接近 皮膚素材に触れないように手を近づけた状態。

接触 皮膚素材の表面にそっと指で触れる状態。

撫でる 皮膚素材の表面に指を滑らせるように触れる状態。

叩く 皮膚素材の表面を瞬間的に数本の指で強く接触する状態。

弾く 親指に人差し指の爪を当てて、人差し指を前に出すように力を入れて爪で皮膚素材に瞬間的に強く接触する状態。

くすぐる 5 本の指を別々に細かく動かして爪で皮膚素材に軽く触れる状態。

弱く押す 皮膚素材の表面を指で軽く押す状態。

強く押す 皮膚素材の表面を指で強く押す状態。

各状態の計測回数を表 1 の左列に示す。静電容量を計測するシステムのサンプリング周波数は 20Hz (20fps) であり、「刺激なし」の状態では手を近づけない状態で 20 フレームの静電容量を計測を 68 回実施した。その他の触覚刺激の計測においては、表に示す回数を実験者が刺激の与え方を変えながら実施した。このデータから各状態においてラ

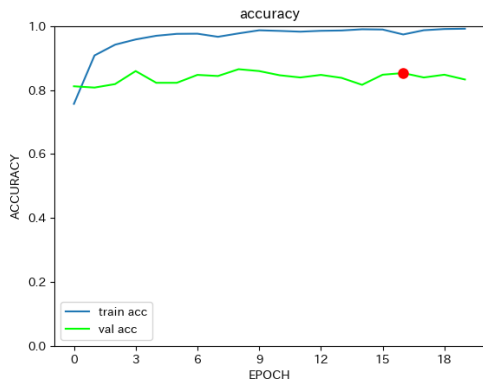


図 4 学習曲線 (正解率)

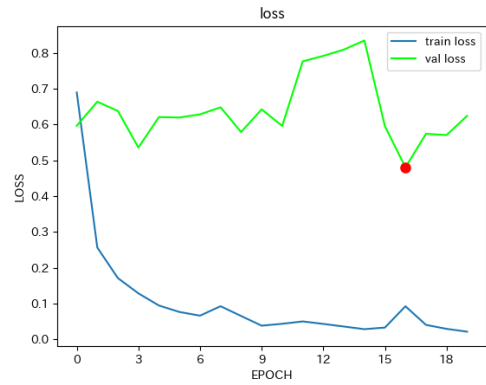


図 5 学習曲線 (損失)

	刺激なし	接近	接触	撫でる	叩く	弾く	くすぐる	弱く押す	強く押す
刺激なし	0.971	0.000	0.029	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
接近	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
接触	0.000	0.000	0.812	0.030	0.010	0.040	0.010	0.010	0.099
撫でる	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
叩く	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
弾く	0.000	0.022	0.000	0.000	0.000	0.978	0.000	0.000	0.000
くすぐる	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.990	0.000	0.000
弱く押す	0.000	0.000	0.111	0.259	0.000	0.000	0.000	0.231	0.398
強く押す	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.067	0.933

図 6 テストデータの正規化混同行列

ランダムに 10% ずつを取り出し、テストデータとした。また、残りのデータの 80% を学習データ、20% を検証データとした。そして、学習データ、検証データ、テストデータそれぞれに対し、データの冒頭から終端まで 20 フレームずつずらして抽出し、その 20 フレームの時系列データを 1 つのデータとした。その結果、各状態の学習、検証、テストデータ数はそれぞれ表 1 の通りとなった。

4.2 識別モデル

図 3 に識別モデルの構成と入出力について示す。識別モデルは、LSTM 層、全結合層、softmax 層で構成されている。LSTM の隠れ層は 1024 とした。センサが計測できる静電容量は 5×5 の 25 点あり、それぞれの点で相互容量と自己容量をそれぞれ計測したため、20 フレーム分の 50 点の時系列データ (20, 50) を入力とした。学習の際には、9 次元の one hot ベクトルを正解データとして与え、softmax 層において各状態の確率が出力されるようにした。その他のハイパーパラメータとして、エポック数を 20、バッチサイズを 32、最適化アルゴリズムを adam、損失関数を categorical_crossentropy、学習率を 0.001 とした。

表 2 テストデータにおける再現率と適合率と F 値

ラベル	再現率	適合率	F 値
刺激なし	0.971	1.000	0.986
接近	1.000	0.933	0.966
接触	0.812	0.854	0.832
撫でる	1.000	0.627	0.770
叩く	1.000	1.000	1.000
弾く	0.978	0.978	0.978
くすぐる	0.990	0.963	0.977
弱く押す	0.231	0.735	0.352
強く押す	0.933	0.677	0.784
平均	0.880	0.863	0.849

4.3 結果

識別モデルの学習曲線を図 4 (正解率) と図 5 (損失) に示す。これらのグラフでは、青色の線が学習データ、緑色の線が検証データの正解率と損失の変化をそれぞれ表している。また、検証データの損失が最も小さい箇所に赤の点をプロットしている。この時点のモデルを使用し、テストデータの識別結果の正規化混同行列を図 6 に示す。また、テストデータの識別結果の再現率、適合率、F 値を表 2 に示す。この結果の通り「弱く押す」の再現率が低いものの、全体では 85.1% の正解率であった。

5. 考察

テストデータでの評価の結果、9 状態を識別する上で 85.1 という高い正解率が得られた。センサの構造は先行研究で提案されてきた触覚センサよりも非常に単純でありながら、皮膚素材で覆っても、撫でる、くすぐる等の触覚刺激だけでなく手の接近、離反、接触の状態を適切に識別することができた。この結果から、試作した触覚センサは LSTM を用いた識別モデルと組み合わせることで、ロボットが人から与えられる触覚刺激に対して適切な反応を返す上で有効に働く可能性があることが示された。

表 2 の通り、9 状態の識別においてほとんどの状態の F 値は 0.9 前後であるが、「弱く押す」のみ 0.352 と低い値に

なっている。これは LSTM に入力した 20 フレームの時系列データの中には触り始めは「接触」や「撫でる」と類似したパターンが含まれており、押す過程において「強く押す」と類似したパターンが含まれていたために、それら 3 つの状態との誤識別が多く発生したことが原因である。この挙動はリアルタイムに識別を行った場合には妥当な出力と言えるため、触覚センサとして使用する上で大きな問題にはならないと考えられる。しかしながら、この結果から圧力センサと同様に押す強さを適切に認識できていると判断することはできないため、押す強弱の識別性能については追加の評価が必要である。

触覚刺激の識別モデルを構築するにあたり、本研究では 1 人の実験者がセンサに触れて触覚刺激のデータを収集した。したがって、本研究で試作したセンサおよび識別モデルによって特定の個人がセンサに触れた場合の触覚刺激を高い正解率で識別できる可能性は示されたが、実験者以外の方が触れた場合においても適切に触覚刺激を識別できるかは明らかになっていない。様々な人の触覚刺激データを収集し、触れる人の多様性（手の形状、触れ方）に対応した識別モデルを構築することは今後の課題である。

触覚刺激の識別モデルとして LSTM を採用したが、他の機械学習モデルとの比較評価は行っていない。そのため、LSTM が最適な識別モデルであるかは明らかになっていない。先行研究で使用されているモデル等、有効と思われるモデルと比較し、より高い精度の識別モデルを構築することは今後の課題である。

本研究で試作した触覚センサは、著者が手作業で製作したものであるため、電極間の微妙な距離やシリコンゴムを張り合わせる際の接着剤の量の均一性は一般的な工業製品としてのセンサよりも劣っていることが考えられる。この均一性を高めることで触覚刺激の識別性能はさらに高まる可能性があり、均一性を高めたセンサを開発・評価することも今後の課題である。

6. 結言

本研究の貢献は次の 2 つである。まず、1) 単純な構造でありながら、柔軟な皮膚素材の下に組み込んでも機能し、その皮膚素材の触感を損ねない厚さ約 0.5mm の静電容量式触覚センサ（空間分解能：5×5）を開発した。そして、2) 開発したセンサを用いて 9 つの状態（刺激なし、接近、接触、撫でる、叩く、弾く、くすぐる、弱く押す、強く押す）におけるセンサデータを取得し、LSTM で学習したところ、高い正解率（85.1%）で識別できることを示した。今後、開発した触覚センサおよび識別モデルを改良し、人から与えられる触覚刺激の意図をロボットが適切に理解できるようになることによる人—ロボットインタラクションへの効果を明らかにしていきたい。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 JP22K12126, JP19K12081

の支援を受けた。

参考文献

- [1] Derlega, V. J., Lewis, R. J., Harrison, S., Winstead, B. A. and Costanza, R.: Gender differences in the initiation and attribution of tactile intimacy, *Journal of Nonverbal Behavior*, Vol. 13, No. 2, pp. 83–96 (1989).
- [2] Hertenstein, M. J., Holmes, R., McCullough, M. and Keltner, D.: The communication of emotion via touch., *Emotion*, Vol. 9, No. 4, p. 566 (2009).
- [3] Field, T.: Touch for socioemotional and physical well-being: A review, *Developmental review*, Vol. 30, No. 4, pp. 367–383 (2010).
- [4] Zheng, X., Shiomi, M., Minato, T. and Ishiguro, H.: How Can Robots Make People Feel Intimacy Through Touch?, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 32, No. 1, pp. 51–58 (2020).
- [5] Nakanishi, H., Tanaka, K. and Wada, Y.: Remote handshaking: touch enhances video-mediated social telepresence, *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems*, pp. 2143–2152 (2014).
- [6] Tanaka, K., Mayuzumi, R., Takahashi, T., Takaki, S. and Oka, N.: Robot Mediated Handholding Combined with a Mobile Video Call Makes the Users Feel Nearer and Closer, *Proceedings of the 9th International Conference on Human-Agent Interaction*, pp. 3–12 (2021).
- [7] Ji, Z., Zhu, H., Liu, H., Liu, N., Chen, T., Yang, Z. and Sun, L.: The design and characterization of a flexible tactile sensing array for robot skin, *Sensors*, Vol. 16, No. 12, pp. 2001–2012 (2016).
- [8] Lee, H.-K., Chang, S.-I. and Yoon, E.: A flexible polymer tactile sensor: Fabrication and modular expandability for large area deployment, *Journal of microelectromechanical systems*, Vol. 15, No. 6, pp. 1681–1686 (2006).
- [9] Liang, G., Wang, Y., Mei, D., Xi, K. and Chen, Z.: Flexible capacitive tactile sensor array with truncated pyramids as dielectric layer for three-axis force measurement, *Journal of Microelectromechanical systems*, Vol. 24, No. 5, pp. 1510–1519 (2015).
- [10] Zhang, Y., Kan, Z., Tse, Y. A., Yang, Y. and Wang, M. Y.: Fingervision tactile sensor design and slip detection using convolutional lstm network, *arXiv preprint arXiv:1810.02653*, p. 7 (2018).
- [11] Dzedzickis, A., Sutinys, E., Bucinskas, V., Samukaite-Bubniene, U., Jakstys, B., Ramanavicius, A. and Morkvenaite-Vilkonciene, I.: Polyethylene-carbon composite (Velostat®) based tactile sensor, *Polymers*, Vol. 12, No. 12, p. 2905 (2020).
- [12] Wang, L., Peng, H., Wang, X., Chen, X., Yang, C., Yang, B. and Liu, J.: PDMS/MWCNT-based tactile sensor array with coplanar electrodes for crosstalk suppression, *Microsystems & nanoengineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 1–8 (2016).
- [13] Yu, P., Liu, W., Gu, C., Cheng, X. and Fu, X.: Flexible piezoelectric tactile sensor array for dynamic three-axis force measurement, *Sensors*, Vol. 16, No. 6, p. 819 (2016).
- [14] Sun, J., Redyuk, S., Billing, E., Högborg, D. and Hemeren, P.: Tactile interaction and social touch: Classifying human touch using a soft tactile sensor, *Proceedings of the 5th International Conference on Human Agent Interaction*, pp. 523–526 (2017).
- [15] Alonso-Martín, F., Gamboa-Montero, J. J., Castillo, J. C., Castro-González, Á. and Salichs, M. Á.: Detecting

and classifying human touches in a social robot through acoustic sensing and machine learning, *Sensors*, Vol. 17, No. 5, p. 1138 (2017).

- [16] Harrison, C., Schwarz, J. and Hudson, S. E.: TapSense: enhancing finger interaction on touch surfaces, *Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 627–636 (2011).