

伸縮性のある静電触覚サーフェスの提案

高柳 直歩^{1,a)} 松久 直司^{1,2,b)} 橋本 悠希^{3,2,c)} 杉浦 裕太^{1,2,d)}

概要: ソフトロボットの触り心地の制御に向けた基礎検討として、透明伸縮性電極と伸縮性絶縁層薄膜からなる伸縮性のある静電触覚サーフェスを開発した。本論文では、サーフェスの構成や状態、手との接触面積の条件を変えたときの知覚可能下限電圧を調査した。

1. はじめに

これまでのロボットのイメージといえば、金属でできたボディを持つ「かたいロボット」であった。しかし近年、「やわらかさ」という概念を加えた「ソフトロボット」という新しい研究分野が注目を集めている [1]。ソフトロボットはその「やわらかさ」で、今までのロボットでは困難であったことを可能にする。例えば、表面が柔らかく、ぶつかったとしても痛くないので、小さな子供と遊ぶことができる。程よい力加減で壊れやすいものを持ち上げるといったことも、ソフトロボットが可能にすることの1つである。加えて、ヒューマンロボットインタラクション (HRI) の分野においては、接触を伴うエンタテインメントロボットが期待されており、実際に aibo (ソニー株式会社) や、LOVOT (GROOVE X 株式会社) といったロボットペットが商品化されている。ユーザはこれらのロボットを撫でたり、抱きかかえたりする。その際の触り心地により、ロボットへの印象は変化する。「フワフワ」や「スベスベ」といった触り心地はユーザに好印象を与え、より遊んでもらえる可能性がある。一方で、「ザラザラ」や「ゴワゴワ」といった触り心地ではその逆となると考えられる。ロボットが嬉しい時やもっと遊んでほしい時はユーザに好印象を与える触り心地に、怒っているときや遊びたくない時は少し悪い印象を与える触り心地にするなど、ソフトロボットの状態や文脈に合わせて変化させることで、多様なインタラクションを提供できるのではないかと考えた。

物体に触れる動作に対する触覚フィードバックは、近年のタッチパネル付きデバイスの普及により、様々な研究が

盛んに行われている。本研究では、手のひらサイズへの触覚提示を目的として静電触覚技術に着目した。

静電触覚技術とは、絶縁層をはさんだ状態で人体と電極に交流の電圧をかけることで、両者の間に働く静電気の吸引力で摩擦力を操作し触覚を提示する手法である。この技術を用いた研究は、すでに様々なものが行われている [2], [3], [4]。しかしこれらは、指先への触覚提示に限定されている。一方で、福田らは導電性のインクを紙に定着させ電極とする紙エレクトロニクス技術に着目し、プリンタブルな大型静電触覚ディスプレイを開発した [5]。この研究は手のひらサイズへの触覚提示を可能としているほか、ある程度の柔軟性も持ち合わせていた。一方で、ソフトロボットの表面への応用を考えると、押し込んで凹ませるといった変形や可動部による伸縮に耐える必要があるのだが、この手法では伸縮性に欠けていた。

そこで本研究では、透明伸縮性電極と伸縮性絶縁層薄膜からなる伸縮性のある静電触覚サーフェスを開発し、基礎実験として以下の三つの条件下での知覚可能下限電圧を測定した。

- 手との接触部位を変えたときの知覚可能下限電圧
- 絶縁層の厚さを変えたときの知覚可能下限電圧
- 伸縮状態を変えたときの知覚可能下限電圧

2. 関連研究

2.1 静電触覚ディスプレイ

静電触覚ディスプレイとは静電触覚技術を用いて触覚フィードバックを行うディスプレイである。前述の通り、静電触覚技術とは静電気で摩擦を操作して物体表面に本来とは違うテクスチャ情報を与える手法である。その原理を図 1 に示す。

電極に交流電圧をかけると、静電気力 F_e によって手がディスプレイに吸着される。ここで、発生する静電気力の大きさは、(1) 式で表される。ただし、電極と指先の距離

¹ 慶應義塾大学

² JST さきがけ

³ 筑波大学

a) naoto20221106@keio.jp

b) naoji@keio.jp

c) hashimoto@iit.tsukuba.ac.jp

d) sugiura@keio.jp

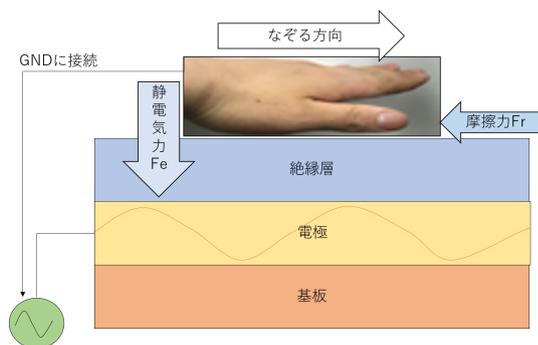


図 1 静電触覚技術の原理

を d 、印加電圧を V 、接触面積を S 、絶縁層の誘電率を ϵ とする。

$$F_e = \frac{\epsilon S V^2}{2d^2} \quad (1)$$

この大きさが時間によって変化することで、摩擦力 F_r が変動し、体験者はディスプレイ表面に凸凹といった本来とは異なるテクスチャ感を得ることができる。この摩擦力の時間変化は、入力波形により制御することができるため、波形を変化させることで様々なテクスチャ感を提供することができる。

この技術を用いた研究として、Bau らは透明な電極と絶縁層を用いて、タッチパネル上に張り付けることで触覚を提示するデバイスや、電流を物体側ではなく、人体に直接流し、任意の物体に触覚を付与する AR システムを考案した [2], [3]。石塚らは、微細加工電極アレイを用いた高解像度な静電触覚ディスプレイを開発した [4]。これらの研究は、指先への触覚提示であったが、福田らは手のひらサイズへの触覚提示が可能であることを示した [5]。この研究に基づきつつ、本研究では透明伸縮電極と伸縮性絶縁被膜に着目し、伸縮性のある新しい静電触覚サーフェスを開発した。

2.2 伸縮センサ・伸縮性電極

近年の材料科学研究の進歩により、伸縮性の高いセンサやディスプレイの製造が可能になった。Weigel らは、身体上でタッチ入力を行うための、最大 30% まで伸縮させて使用することができる新しい皮膚装着型センサを開発した [6]。また、Wessely らはセンシング機能とビジュアル出力を兼ね備えた伸縮自在のユーザインタフェースを開発した [7]。Xu らは伸縮可能なキーボードを考案した [8]。これらの研究は、加工が容易なシリコンベースの有機ポリマーであるポリジメチルシロキサン (PDMS) を使用している。PDMS は高い伸縮性と絶縁性を持ち合わせているため、今回開発した静電触覚サーフェスの絶縁層に使用した。

代表的な導電性ポリマーにはポリ (3,4-エチレンジオキシチオフェン) (PEDOT) とポリスチレンスルホン酸 (PSS) から成る PEDOT:PSS が存在する。PEDOT:PSS

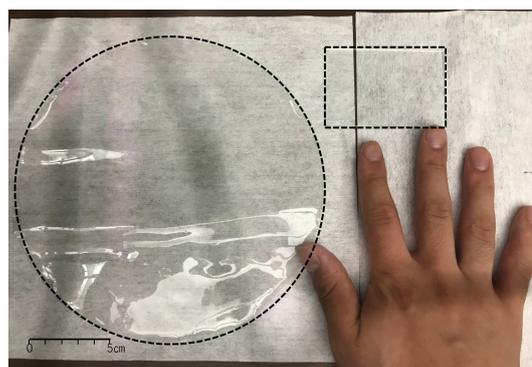


図 2 作成した静電触覚サーフェス
ガラス板サイズと手のひらサイズの比較

は伸縮性が低いという問題はあるものの、他の導電性ポリマーに比べ安定性・透明性・成膜性に優れている。石塚らは PDMS 基板の間に PEDOT:PSS を挟んだ柔軟な静電触覚ディスプレイを開発している [9]。一方で、Wang らは PEDOT:PSS に添加剤を加えて、導電性を維持しながら伸縮性を大きく向上させることに成功した [10]。このことを参考にし、添加剤で伸縮性を向上させた PEDOT:PSS を用いて、本サーフェスの導電層を構成した。

3. 実装

3.1 実験用サーフェス

3.1.1 材料

サーフェスの基板には、スチレン系熱可塑性エラストマー (SEBS, 旭化成株式会社, H1062) と熱可塑性ポリウレタン (TPU, 日本ミラクトラン株式会社, P22MBRNAT:DMF) の 2 つを用いた。導電層には、フッ素系界面活性剤 (Apollo Scientific Ltd., Capstone FS30) と LiTFSI (リチウムビス (トリフルオロメタン) スルホン) イミド (東京化成工業株式会社) の 2 つを添加した PEDOT:PSS (Heraeus, PH1000) を使用している。絶縁層には PDMS (Dow Inc., SILPOT 184) の A 液と B 液を 12:1 で混ぜ合わせたものを使用した。

3.1.2 製造プロセス

実験用のサーフェス一枚 (50 mm × 75 mm のガラス板サイズ) の製造プロセスを以下に示す。本研究では、このサイズに加え、実験 1 では手のひら大への触覚提示を行うため、半径 100 mm のシリコンウエハーサイズ (ガラス板の約 8 倍) のサーフェスも使用した (図 2)。

初めに、シクロヘキサンに 80 mg/mL の濃度で溶かした SEBS (4 mL) をガラス基板 (又はシリコンウエハー) にドロップキャストした。ドロップキャストとは基板に水溶液を滴下して蒸発させることで、数 10 μm 程度の厚膜を作る手法である。SEBS はごみを取り除くため、pore size 1 μm の Glass fiber (GF) フィルターでろ過してから使用した。この状態で、自然乾燥させるため、シャー

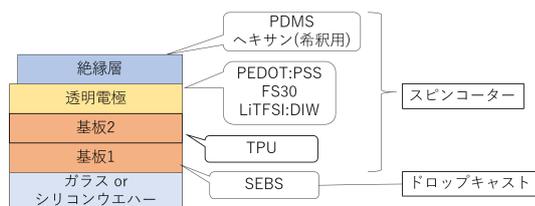


図 3 伸縮性のある静電触覚サーフェスの断面

レをかぶせて一晩放置した。表面を親水化するため、UV オゾン洗浄装置 (Novascan Technologies, Inc., Novascan PSD Pro-series) で 10 分間処理をした。次に、100 mg/mL の TPU (1 mL) をスピナー (ハイソル株式会社, ACE-200) を使い、1000 rpm で 60 秒間スピコートした。スピコートした後、110 °C で 10 分間ベークした。さらに、10 分間の UV オゾン処理で表面を親水化して、基板が完成した。

次に導電層の説明に入る。使用前に GF フィルターでろ過した PEDOT:PSS (1 mL) に対して、40 mg/mL の LiTFSI:DIW (0.25 mL) と FS30 (10 μ L) を少しずつ加えて、よく混ぜ合わせた。こうしてできた溶液を基板の上に、1000 rpm で 60 秒間スピコートした。スピコートした後、110 °C で 10 分間ベークし、導電層が完成した。

最後に、絶縁層について説明する。絶縁層に用いた PDMS は A 液と B 液を 12:1 の割合で、混ぜ合わせたものである。この際、気泡が出来ないように自転・公転方式ミキサー (株式会社シンキー, ARE-310) を使用した。PDMS をスピコートする前に、既に固まっている PDMS を導電層の一部に貼り付けた。その後、PDMS 混合液 (約 3 g) を導電層の上に、1000 rpm で 60 秒間スピコートした。これは、完成後に貼り付けた PDMS を剥がし、導電層がむき出しになる部分を作るためである。スピコートした後、120 °C で 30 分間ベークし、絶縁層が完成した。その後、ガラス基板から剥がして、伸縮性のある静電触覚サーフェスが完成した。その断面の構成を図 3 に示す。

また、実験 2 で絶縁層の厚さが知覚可能下限電圧に影響を与えるか調査するため、膜厚の異なるサーフェスが必要となる。本研究では、ヘキサンで PDMS を希釈する方法を採用した。ヘキサンは沸点が 69 度と低く、希釈した PDMS をスピコートした後、加熱することで蒸発して膜から消えるため、膜厚を薄くすることが可能である。希釈する割合によって、膜厚を調整することができる。この手法で、異なる膜厚の絶縁層を持つ、静電触覚サーフェスを 3 種類作成した。以降この 3 種類のサーフェスを S1, S2, S3 と呼ぶ。それぞれの絶縁層の膜厚をレーザー顕微鏡 (KEYENCE, VK-X1000) で測定した。希釈割合と合わせて、結果を表 1 にまとめた。

表 1 3 種類のサーフェスの PDMS の希釈割合 (質量比) と膜厚

種類	希釈割合 (PDMS : ヘキサン)	膜厚
S1	無希釈	57.5 μ m
S2	2:1	17.9 μ m
S3	1:2	7.2 μ m

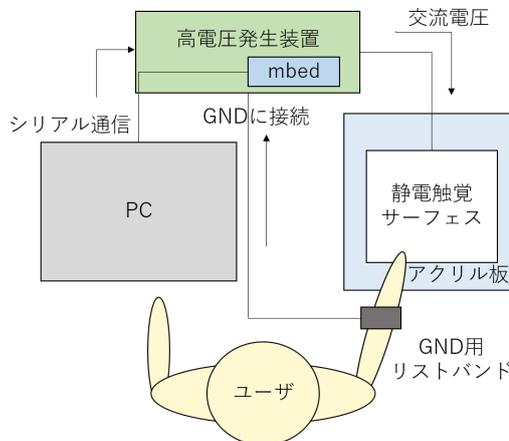


図 4 実験 1~3 における装置構成

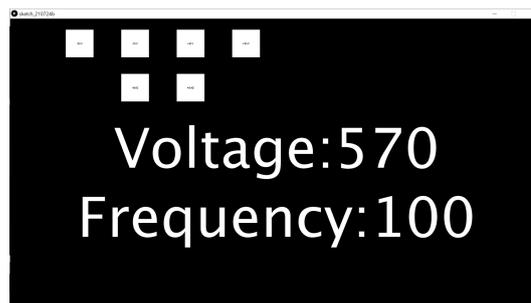


図 5 実験 1~3 で使用した UI

上 4 つのボタンで電圧を操作できる (-50, -10, +10, +50)
下 2 つのボタンで周波数を操作できる (-10, +10)

3.2 装置構成

実験 1~3 に使用した、装置の構成を図 4 に示す。

作成した静電触覚サーフェスは、アクリル板に貼り付けて使用した。これは、サーフェス自体が振動するのを防ぐためである。PC と高電圧発生装置は、mbed を介して、USB ケーブルで接続している。実験をスムーズに行うため、mbed とシリアル通信をして、Processing で電圧や周波数をボタン操作できる簡単な UI (図 5) を実装した。

高電圧発生装置の出力端子をサーフェスの電極へ、GND 端子を GND 用リストバンドへ接続した。高電圧発生装置は、文献 [11] を参考に著者らで作成をした。この高電圧発生装置の最大印加電圧は 570 V である。なお、この装置では周波数を調整することもできるのだが、以降の実験では先行研究において知覚強度が高いとされている 100 Hz の正弦波に固定した [12]。

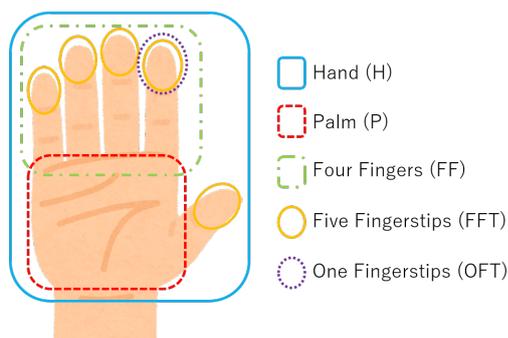


図 6 被験者がサーフェスをなぞる際の各接触部位

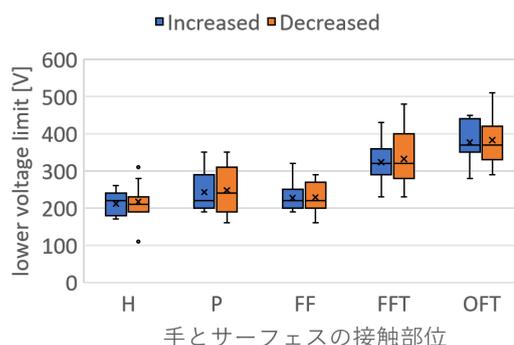


図 7 各接触部位と知覚可能下限電圧

4. 実験 1: 接触部位と知覚可能下限電圧

4.1 実験目的

従来の静電触覚ディスプレイの多くは、指先への触覚提示が多い。本研究の利点の一つ、手のひらサイズへの触覚提示が可能かどうかを調査する。手のひらサイズへの静電触覚の提示についての先行研究では、接触部位が大きいほど知覚可能下限電圧は低くなる、つまり、感度が上昇することがわかっている [5]。しかし、本研究とは素材が全く異なる。性質に同様の傾向があるかどうかを確かめるため、先行研究と同じ、手の平の 5 つの接触部位にて、知覚可能下限電圧を測定した。

4.2 実験条件

4.2.1 実験手法

実験 1 では、3.1.2 で挙げたサーフェスのうち、S1 を使用して各接触部位での知覚可能下限電圧を測定した。手のひらサイズへの触覚提示を行うため、通常のガラス板サイズの 8 倍の大きさの、半径 100 mm のシリコンウエハーサイズのサーフェスを用いた。測定は極限法に準じて行った。被験者は、電圧を印加している状態としていない状態のサーフェスを任意の回数なぞり、それぞれの間に触覚の差異があるか無いかの 2 択で回答した。差異があると答えた場合、被験者は静電触覚を知覚している、無いと答えた場合、被験者は静電触覚を知覚していないとした。

4.2.2 接触部位

本実験では先行研究 [5] に倣い、被験者には手の平の 5 つの部位、Hand (H)、Palm (P)、Four Fingers (FF)、Five Fingertips (FFT)、One Fingertips (OFT) でサーフェスをなぞるように指示した。図 6 に各接触部位の概要を示す。

4.2.3 実験手順

初めに、出力最大電圧である 570 V から 50 V 刻みで電圧を降下させていき、被験者に差異を感じるかどうかを尋ねた。被験者が最後に差異があると答えた時の電圧値を x V とすると、上昇時は $x - 100$ V、下降時は $x + 50$ V を基準

値として、そこから 10 V 刻みで電圧を変化させ測定を行った。これは、実験時間の短縮のために行ったものである。上昇時には最初に差異を感じた電圧を、下降時には最後に差異を感じた電圧をそれぞれ記録した。これら一連の工程を 5 か所の接触部位に対して、3 セットずつ行った。

被験者は、21 歳～25 歳の男性 5 名であった。実験中、手汗による触覚の減衰を防ぐため、被験者には適度にティッシュペーパーで手を拭くよう指示した。実験は 1 人当たり約 45 分かかった。

4.3 実験結果

各接触部位に関して、上昇系列と下降系列で記録した知覚可能下限電圧の箱ひげ図を図 7 に示す。Kruskal-Wallis 検定と Dunn-Bonferroni 法による多重比較検定を行った結果 FFT-H, P, FF 間および OFT-H, P, FF 間で有意差が見られた ($p < 0.05$)。ここで、H, P, FF と FFT, OFT に分けて考える。前者の知覚可能下限電圧は 200 V 程度であるのに対して、後者の知覚可能下限電圧は 300 V 以上と、100 V 程度の差が現れている。この傾向は、先行研究の傾向と同様であり、本サーフェスも手の平全体で使用することが可能であると言える。知覚可能下限電圧が小さく済むということは、感度が高いということであり、手の平全体で使用するときは、より詳細なテクスチャ情報を付与することができるのではないかと考える。

5. 実験 2: 絶縁層の厚さと知覚可能下限電圧

5.1 実験目的

2.1 にて記した通り、被験者が受ける静電気力の大きさは電極と指先の距離、つまり絶縁層の厚さの二乗に反比例する。絶縁層の厚さを薄くすることで、感度が上がるのではないかと考えた。そこで、膜厚の異なる三種類のサーフェスを用いて、絶縁層の厚さと知覚可能下限電圧の関係を調査した。

5.2 実験条件

実験 2 では、3.1.2 で挙げたサーフェスのうち、S1～S3

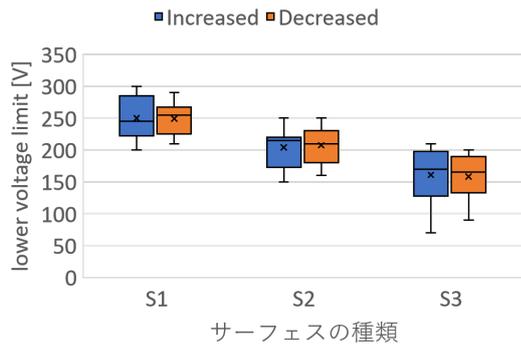


図 8 各サーフェスと知覚可能下限電圧

の全てのサーフェスを使用した。本実験にはガラス板サイズのサーフェスを用いた。被験者には3本指でなぞるように指示した。測定は、実験1と同様の極限法で行い、1つのサーフェスにつき3セット行った。被験者は、21歳～25歳の男性5名であり、適宜ティッシュペーパーで手汗を拭き取るように指示した。実験は1人当たり約45分かった。

5.3 実験結果

各サーフェスの上昇系列と下降系列で記録した知覚可能下限電圧の箱ひげ図を図8に示す。Kruskal-Wallis検定とDunn-Bonferroni法による多重比較検定を行った結果、それぞれの間に有意差が見られた ($p < 0.05$)。この結果から、絶縁層を薄くすることで感度を向上させることができると分かった。

6. 実験3: 伸縮状態と知覚可能下限電圧

6.1 実験目的

本研究の最大の特徴はサーフェスが伸縮可能であることだ。しかし、伸縮させることで触覚提示が不可能になる、または大幅に感度が悪化してしまえば意味がない。そこで、実験3ではサーフェスの伸縮状態を変えたときの知覚可能下限電圧を測定し、伸縮させての使用が可能であることを確かめた。

6.2 実験条件

実験1では、3.1.2で挙げたサーフェスのうち、S1を使用した。伸縮状態は50%伸ばした状態、25%伸ばした状態、一度50%伸ばし元に戻した状態、何もしていない状態の4種類を用いた(図9)。サーフェスの伸縮状態を固定するため、両面テープとテープで上下から固定して実験を行った。測定は極限法を使い、実験1, 2と同様に3セットずつ行った。被験者は、21歳～25歳の男性5名であり、適宜ティッシュペーパーで手汗を拭き取るように指示した。実験は1人当たり約45分かった。

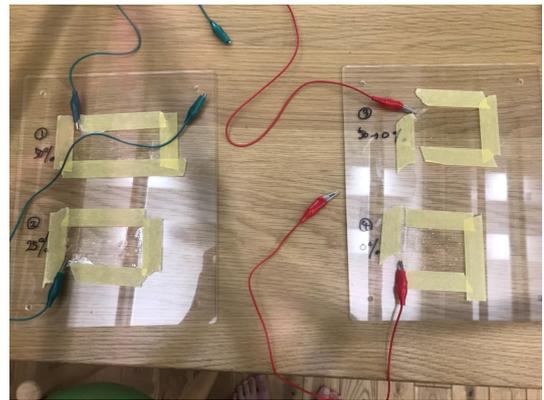


図 9 実験3の様子。50%伸ばした状態(左上)、25%伸ばした状態(左下)、一度50%伸ばし元に戻した状態(右上)、何もしていない状態(右下)

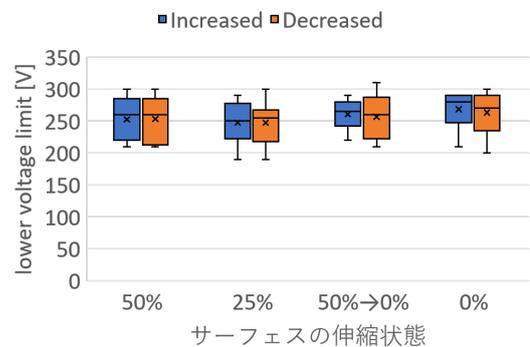


図 10 各状態と知覚可能下限電圧

6.3 実験結果

各状態での上昇系列と下降系列で記録した知覚可能下限電圧の箱ひげ図を図10に示す。Kruskal-Wallis検定とDunn-Bonferroni法による多重比較検定を行ったが、有意差は見られなかった。このことから、本静電触覚サーフェスは感度を損なうことなく伸縮させて使用することが可能となる。

7. 議論と制約

実験1～3より、本研究は手のひら大への触覚提示を行う伸縮可能なサーフェスを開発できたが、いくつかの制約がある。第一に、伸縮率は50%までしか対応していない点である。本サーフェスに用いた各層の素材は、理論上100%まで伸ばすことができるのだが、本サーフェスでは75%～100%ほど伸ばした状態で触ると絶縁層が剥がれてしまうことが分かった。今回用いた絶縁層と導電層の親和性が低かった可能性がある。伸縮率の向上は今後の課題である。次に、使用可能な期間が短いという問題がある。本サーフェスの導電層は湿気に弱く、真空状態で保存する必要があった。また、使用しているうちに絶縁層が破れてしまうことも多々あった。そのため、耐久性の向上も今後の課題である。

本サーフェスは伸縮性に加え、非常に薄く、十分に透明

である。本研究の目的であったソフトロボットへの貼り付けは外観を損なうことなくできると考えられる。一方で、既製品への貼り付けを考えると曲面に気泡が入らないように張り付けるのは困難である。この場合は、製造工程でロボットの外側に膜を構成するほうが適している可能性も考えられる。

最後に、本サーフェスはその伸縮性を活かして他のアプリケーション、例えば人の腕などに装着してユーザインタフェースとしての使用などにおいても有効利用できる可能性がある。

8. おわりに

本研究では、透明伸縮性電極と伸縮性絶縁層薄膜に着目し、伸縮性のある静電触覚サーフェスの開発に成功した。手のひら大への触覚提示が可能であり、絶縁層を薄くすることで感度を向上させることが可能だと分かった。本サーフェスの最大の特徴である伸縮性については、感度を損なうことなく伸縮率 50% までの範囲で使用することができた。今後は、伸縮率と耐久性の向上を実施する。

謝辞

本研究は、JST さきがけ（課題番号: JPMJPR20B7）、JST AIP-PRISM（課題番号 JPMJCR18Y2）、（一財）イオン工学振興財団の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] 鈴森康一: 新学術領域研究「ソフトロボット学」, 日本ロボット学会誌, Vol. 37, No. 1, pp. 53–56 (2019).
- [2] Bau, O., Poupyrev, I., Israr, A. and Harrison, C.: TeslaTouch: electrovibration for touch surfaces, *Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 283–292 (2010).
- [3] Bau, O. and Poupyrev, I.: REVEL: tactile feedback technology for augmented reality, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 31, No. 4, pp. 1–11 (2012).
- [4] Ishizuka, H., Suzuki, K., Terao, K., Takao, H. and Shimokawa, F.: Development of high resolution electrostatic tactile display, *2017 International Conference on Electronics Packaging (ICEP)*, IEEE, pp. 484–486 (2017).
- [5] 福田哲生, 柳沢卓, 橋本悠希: プリントブルな大型静電触覚ディスプレイにおける基礎特性の検証, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 25, No. 4, pp. 346–355 (2020).
- [6] Weigel, M., Lu, T., Bailly, G., Oulasvirta, A., Majidi, C. and Steimle, J.: Iskin: flexible, stretchable and visually customizable on-body touch sensors for mobile computing, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 2991–3000 (2015).
- [7] Wessely, M., Tsandilas, T. and Mackay, W. E.: Stretchis: Fabricating highly stretchable user interfaces, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 697–704 (2016).
- [8] Xu, D., Tairyach, A. and Anderson, I. A.: Stretch not flex: programmable rubber keyboard, *Smart Materials and Structures*, Vol. 25, No. 1, p. 015012 (2015).
- [9] Ishizuka, H., Hatada, R., Cortes, C. and Miki, N.: Development of a fully flexible sheet-type tactile display based on electrovibration stimulus, *Micromachines*, Vol. 9, No. 5, p. 230 (2018).
- [10] Wang, Y., Zhu, C., Pfattner, R., Yan, H., Jin, L., Chen, S., Molina-Lopez, F., Lissel, F., Liu, J., Rabiah, N. I. et al.: A highly stretchable, transparent, and conductive polymer, *Science Advances*, Vol. 3, No. 3, p. e1602076 (2017).
- [11] Yem, V. and Kajimoto, H.: Comparative evaluation of tactile sensation by electrical and mechanical stimulation, *IEEE transactions on haptics*, Vol. 10, No. 1, pp. 130–134 (2016).
- [12] Pyo, D., Ryu, S., Kim, S.-C. and Kwon, D.-S.: A new surface display for 3D haptic rendering, *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, Springer, pp. 487–495 (2014).