

E-MASK: プリンテッドエレクトロニクス技術を用いたマスク型センシングデバイス

國見友亮^{1,2} 金澤周介² 尾形邦裕² 松本吉央^{1,2}

概要: フェイスマスクは身体に密着する装具であり、ウェアラブルデバイスの機能を搭載する母材として期待できる。Covid-19の影響によりマスクの装着が世界中に浸透したことはこれを助長する。従来研究のマスク型センシングデバイスは、マスクに硬いセンサを取り付けたり、マスクと口唇の間にセンシングデバイスを挟み込んだりすることで口唇周辺の動きを計測していた。しかしながら従来デバイスはマスクにセンサを取り付け計測するため、センサ部分が他者に見えてしまい、日常に溶け込むことができるマスク型センシングデバイスの利点が失われていた。このような問題を解決するため本研究では、マスク形状にカットした布に高感度なひずみセンサを印刷しマスクの薄いという特性を保ちつつ日常生活で使用できる、口唇周辺の動きから生じる柔軟なマスクのひずみを計測することが可能な E-MASK を提案する。

キーワード: フェイスマスク, ひずみ計測, プリンテッドエレクトロニクス, ウェアラブルデバイス

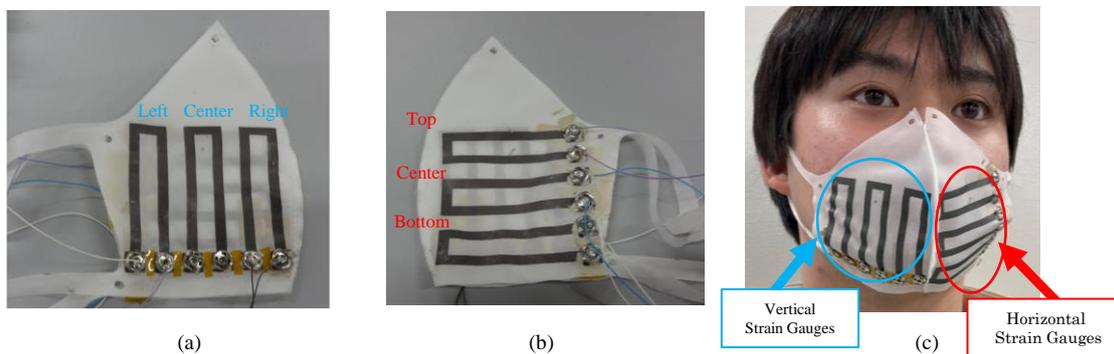


図 1 E-MASK の概要. (a) E-MASK の右面. (b) E-MASK の左面. (c) E-MASK を装着した例

1. はじめに

Covid-19 の感染拡大はフェイスマスクの着用を世界規模で浸透させた。これに伴いマスク形状を利用した様々なウェアラブルデバイスの開発が行われている。しかしながら、従来研究で提案されてきたフルフェイス型のマスク型デバイスは、従来のコミュニケーションを拡張するものであったが、対面の音声コミュニケーションを阻害する。また、フェイスマスク型センシングデバイスはマスクに硬いセンサを取り付けたり、マスクと口唇の間にセンシングデバイスを挟み込んだりすることで口唇周辺の動きを計測しており、センサ部分が他者に見えてしまい、日常に溶け込むことができるマスク型センシングデバイスの利点が失われていた。

このような問題を解決するため本研究では、マスク形状にカットした布に高感度なひずみセンサを印刷しマスクの薄いという特性を保ちつつ日常生活で使用できる、口唇周辺の動きから生じる柔軟なマスクのひずみを計測することが可能な E-MASK(図 1)を提案する。

2. 関連研究

従来のマスク型デバイスは大きく分けて 2 つの項目に分けられる。1 つ目はコミュニケーションの拡張。2 つ目はサイレントスピーチインタフェースである。本章では関連研究に触れ、本研究の新規性を明らかにする。

2.1 コミュニケーションの拡張

フルフェイス型マスク型デバイスは人の存在をロボットや他者、アバターに憑依させコミュニケーションを拡張するデバイスである。テレプレゼンスシステムとして提案された ChameleonMask[1]は、従来のテレプレゼンスの常識であった憑依先をロボットではなく人間が行い、また操作者の顔を人の顔の上に表示することで人の身体性と存在を両立したシステムであった。You as a Puppet[2]では人形劇で使用されるパペットの動きを人のモーションキャプチャの動きと連動させ、HMD を用いてパペットの視点をフィードバックすることで、パペットへの没入感を上げる研究であった。また、e2-MaskZ[3]では顔の前のディスプレイに自

¹ 東京大学
The University of Tokyo

² 産業技術総合研究所
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

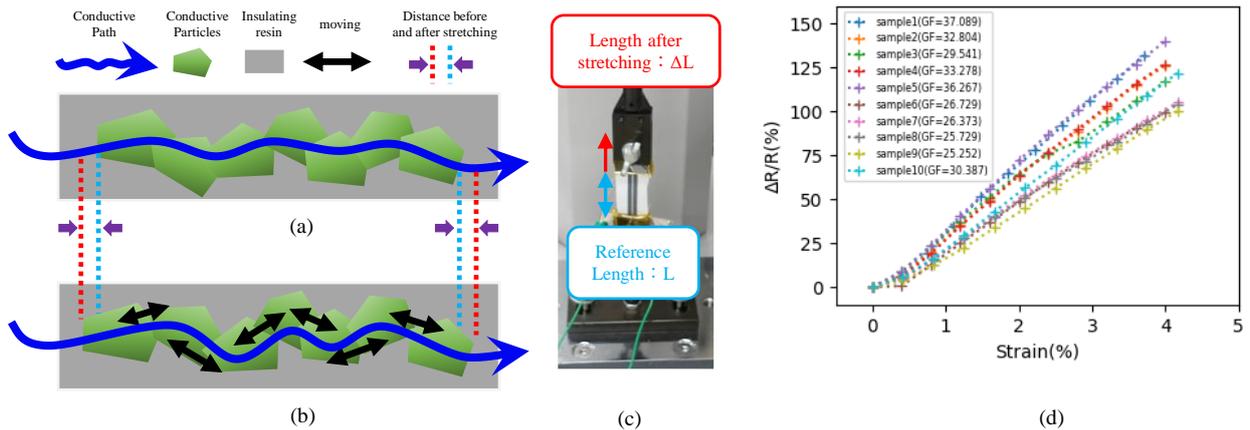


図2 ひずみゲージの測定原理. (a)ひずむ前のひずみゲージ. (b)ひずんだ後のひずみゲージ. (c)ゲージ率を測定するための測定体系. (d)本研究で用いるひずみゲージのゲージ率.

身の表情を反映したアバターを表示することで、アバターを使用したコミュニケーションの拡張を行っていた。

2.2 マスク型センシングデバイス

サイレントスピーチとは口唇周辺及び口腔内の情報などから発話内容を推定する研究である[4]。従来研究で提案されてきたサイレントスピーチインタフェースはセンサを顔に付けたり、計測装置を手で固定する必要があるため、SSIは手軽に使用できるウェアラブルインタフェースではなく、日常生活で使うことは困難であった。このような問題を解決できるような日常生活でも使用できるサイレントスピーチ認識を行えるマスク型サイレントスピーチインタフェースの開発が行われている。Mascreen[5]はPhoto Reflectorをマスクと口の間に設置し、顔の変形による光の反射の変化から表情や音素を推定する。Silent-Mask[6]は加速度センサをマスクに取り付け、発話時のマスクのずれによる加速度を計測することで単語の推定を行えることを確認した。また、銅をシリコンで包んだTENGをマスクに印刷し顎の動きを計測し、少数のコマンドを推定する研究もある[7]。加えて、マスクの上に導電紙を貼り付け、計測した静電容量分布から日本語の母音を推定する研究も存在した[8]。これらの研究は簡単に着脱でき、マスクにセンサ機能を付与しインタフェースにする研究であった。

コミュニケーションの拡張の研究ではデバイスを起動させていない時に対面のコミュニケーションを阻害していた。また、マスク型サイレントスピーチインタフェースではセンサをマスクに取り付けているためセンサ部分が他者に見えてしまったり、顔にセンサが当たってしまったりするため日常的に使用することは難しかった。本研究では日常的に使用されるマスク自体をセンシングデバイスとすることで、日常に溶け込むことができるウェアラブルデバイスを提案する。

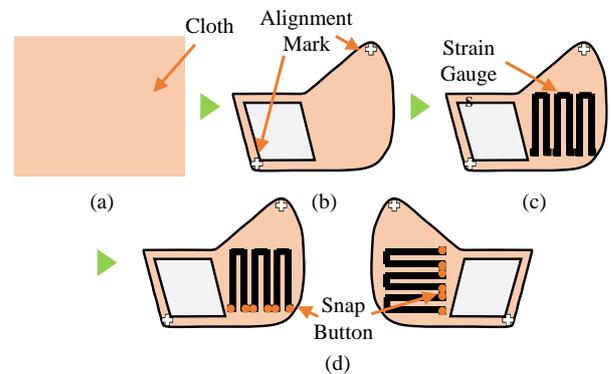


図3 E-MASKの実装方法. (a)カット前の布. (b)レーザーでカットされた布. (c)ひずみゲージが印刷された布. (d)スナップボタンを取り付けたマスク.

3. E-MASK

本研究の目的は日常生活で手軽に使うことができるマスク型センシングデバイスの開発である。本研究では日常生活で人目を気にせず使用できるよう、薄く柔軟な基材に機能層を直接形成できるプリンテッドエレクトロニクス技術に注目した。本研究では高感度なひずみゲージをマスクに印刷し、口唇周辺の変形に追従したマスクの変形をひずみとして計測し、得られたセンサを解析することで口唇周辺の情報を計測するシステムを提案する。これをE-MASKと呼ぶ。従来の研究ではマスクという薄い形状を活かすのではなく、マスクにセンサを縫い付けたりマスクの形状に合わせたケースにセンサを取り付けたりすることでインタフェースとしていた。しかし、これらの従来研究ではマスク本来の薄いという特性を利用していなかったため、本研究ではマスクの元となる布の特性を利用したマスク型センシングデバイスを提案する。本研究ではマスクに柔軟なひずみセンサを印刷することで、口唇周辺及び顔の変形を布の伸縮から計測することが可能な日常的に使用できるマスク型

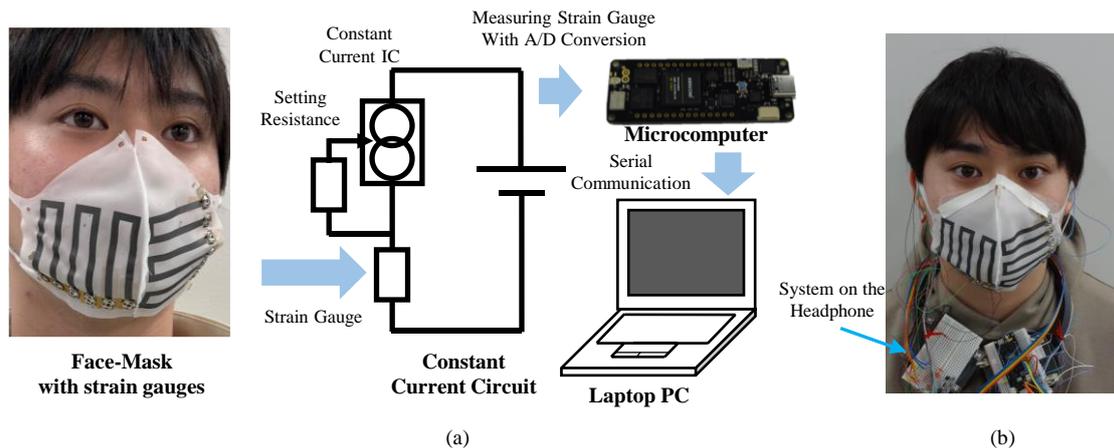


図 4 E-MASK のシステム構成. (a)E-MASK の電圧値を計測するためのシステム概要. (b)システムのウェアラブル化

センシングデバイスを提案する.

3.1 ひずみゲージのゲージ率の確認

本研究で使用するひずみゲージは導電粒子と絶縁性の樹脂を有機溶媒とともに混練したインクで構成される[9]. 本研究で使用するひずみゲージの抵抗変化の原理について説明する. ひずみゲージの構成は図 2(a)に示すように, 膜の中で導電粒子が接点を形成することで膜に導電性が生まれる構成となっている. 図 2(b)に示すようにひずみゲージは応力を受けることで導電粒子間の接点に変化することため, 一般的な金属薄膜よりも大きなゲージ率が得られる仕組みとなっている. 印刷形成される歪みセンサからは他のグループからも高いゲージ率が報告されている[10, 11, 12]. これらの先行研究は可撓性のフィルムまたは伸縮性のエラストマーを基材としてひずみ検知層を形成している.

本研究では布地に直接ひずみ検知層を形成するため, 基材が異なる場合でも既存の報告と同様に高ゲージ率が得られるかを測定する実験を行った. 今回, マスク型センシングデバイスと同じ布, 同じインクを用いて作成したひずみゲージのゲージ率の測定を行った. 図 2(c)に測定体系を示す. ゲージ率の測定では伸ばす前後での長さ, 抵抗を測定しておき, ゲージ率を求める. ゲージ率は式 1 で求められる. L は伸ばす前の長さ, ΔL は L から伸ばした長さ, ϵ は歪み率, R は伸ばす前の抵抗, ΔR は抵抗 R から ΔL 伸ばした時の抵抗である. 測定結果を図 2(d)に示す. 結果から, ゲージ率は 26~37 で確認でき, $GF=31.0 \pm 4.30$ であった. この結果から, 一般的な金属箔のひずみゲージ($GF=2.0$)よりも高感度なことが確認できた. 本研究では従来のひずみゲージよりも 10 倍以上高感度なフレキシブルなひずみゲージをマスク上に印刷することで, マスクのひずみを計測することを試みた.

$$GF = \frac{\Delta R}{\Delta L} = \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{R}{\epsilon} \quad (1)$$

3.2 E-MASK の実装方法

本研究ではマスク型センシングデバイスの型の設計, 印刷, 計測回路との接点の縫い付けまでの 3 プロセスを通して作成を行った. そのため本マスク型センシングデバイスの作成方法について説明する.

- (1). 本研究ではマスクの型紙を図 3(a)のような硬い布 2DCAD 上で作成したマスク形状にレーザーカッターでカットした. 図 3(b)のようにひずみゲージを印刷する際に位置合わせをするためのアライメントマークもカットすることでひずみゲージがマスク上に収まるように印刷できる構成とした.
- (2). マスクの型紙同様, 2DCAD を用いてマスク上に印刷するひずみゲージのパターンを設計し, 印刷用の版の設計し, 版の作製を行った. 作成した自作の版を印刷機にセットし, 最初に紙にアライメントマークの印刷を行い, マスクの位置キャリブレーションを行う. 今回, 金澤らが提案したインクの配合を参考にし, 作成したインクを使用した. インクは印刷機を用いてマスク上に塗られ, オープンで焼くことで有機溶剤を気化させ, 図 3(c)のようになる.
- (3). ひずみゲージが印刷されたマスクはそのままでは計測回路に接続することができず, 計測回路との接点が必要である. そのため, 本研究では図 3(d)のようにひずみゲージの端点に導電糸を用いて金属のスナップボタンを縫い込むことで計測回路との接点とした. またスナップボタンはオス・メスに分かれているためオス側に配線をはんだ付けすることで簡単に計測回路と接続することが可能である.

本研究では図 1(a), (b)のようにマスク型センシングデバイスの試作としてマスクの右面に縦のひずみを計測するためのひずみゲージ, 左面には横のひずみを計測するための

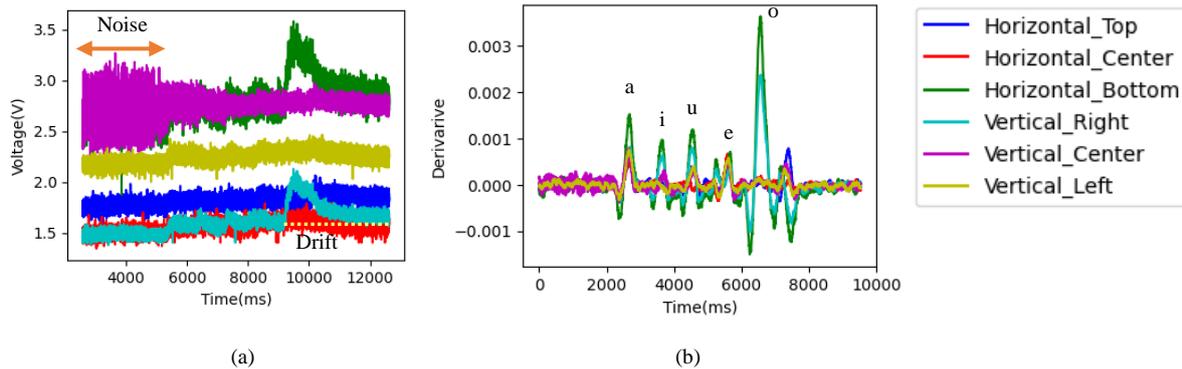


図 5 E-MASK の動作確認. (a)日本語の母音を発話した際の電圧値. (b)日本語の母音を発話した際の微分値.

ひずみゲージを印刷した. 図 1(c) に示すようにひずみゲージはそれぞれの面に 3 つずつ場所を変えて印刷することで, マスクの変形によって得られる情報量を増やすことを試みた.

3.3 ひずみゲージが印刷されたマスク型デバイス

E-MASK はひずみゲージを印刷したマスク, ひずみゲージの抵抗変化を電圧値として表現する計測回路, 計測回路の電圧を読み取りシリアル通信で PC にデータを送るマイコン, マイコンからの電圧値を取得し, コマンドを推定するノート PC で構成される. E-MASK の構成を図 4(a)に示す. 本システムで使用する定電流回路では定電流 IC を用いて設定抵抗を用いて設定した定電流をひずみゲージに流すことで, ひずみゲージの抵抗変化を電圧値で測定することとした. 計測回路の電圧はマイコンから 5 V 印可して稼働させるため, ひずみゲージにかかる電圧が 5 V 以内に収まるように電流値を設定した. 電圧値はマイコンで読み取られ, A/D 変換されシリアル通信を用いてノート PC に保存される. ノート PC では保存された時系列の電圧値を解析し, 発話内容を推定する流れとなっている. 本研究では計測回路は図 4(b)のようにヘッドホンの耳の部分に取り付けることで使用者への負担が少なくデータが取得できる構成とした.

本研究で使用するひずみゲージの特性について説明する. 本研究で使用するひずみゲージは高感度かつフレキシブルにひずみを計測することができるため, 従来の金属薄膜ひずみゲージよりも優れたセンサであった. しかし, 本研究で使用するひずみゲージはセンサの伸縮前後のベースライン電圧が変化するドリフトが発生していた. そのためひずみゲージから計測される電圧値はドリフトの影響を受けるため, そのまま電圧値を用いた推定を行うことは困難である. 本研究ではドリフトに影響されずにセンサ値の変化を得られる微分値を推定に用いることとした. 微分値の推定には低ノイズに微分値を得るために N 区間(計測された 500 点)のセンサ値を多項近似し, この関数の導関数を得

ることで微分値を解析的に算出することとした. 電圧値を多項近似した式を 2 に示す. 式 2 の t は N 区間内の任意の時刻, X_i は時刻 t における電圧値, a, b, c は多項近似の定数項である. 式 3 に示すように, 微分値の計算には式 2 を微分した式を用いた.

$$\begin{pmatrix} \sum t^4 & \sum t^3 & \sum t^2 \\ \sum t^3 & \sum t^2 & \sum t \\ \sum t^2 & \sum t & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum X_i t^2 \\ \sum X_i t \\ \sum X_i \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$X_i = at^2 + bt + c \quad (3)$$

$$\dot{X}_i = 2at + b \quad (4)$$

3.4 動作確認

マスク型センシングデバイスを用いて口唇周辺の情報を計測できるか確認するため, "aiueo" と発話した際のデータについて計測し確認を行った. 電圧値を図 5(a)に示す. 本研究で作成したひずみゲージは従来の高感度かつフレキシブルなひずみゲージ同様, ベースラインが変わってしまうというドリフト減少が存在した. そのため, ベースライン電圧の変化, ノイズの影響を軽減するために電圧値から微分値に変換を行った. 微分値を図 5(b)に示す. この結果から微分値を用いた場合は "aiueo" という日本語の母音に対応した微分値のピークを確認でき, 加えてノイズが低減されていることがわかる. この結果から発話時の口唇周辺の変化をひずみゲージで取得できることを確認した. また, 図 5(e)を確認したところ, 微分値の振幅は各々違い, "aiueo" と発話した際に反応しているひずみゲージと反応が小さいひずみゲージが存在することが確認できる. これはひずみゲージを複数印刷していることで, それぞれが異なった情報を取得できている可能性を示している.

4. まとめ

本研究ではマスク型センシングデバイス、E-MASKの計測原理、実装方法、動作確認を行った。その結果、E-MASKは日常的に使用できるマスク自体をセンシングデバイスとすることが可能であることを示した。今後は実際に口唇周辺の変形から生じるマスクのひずみから発話内容の推定・表情の推定が行えるか実験を行う。

参考文献

- [1] Kana Misawa and Jun Rekimoto. 2015. ChameleonMask: Embodied Physical and Social Telepresence using Human Surrogates. In Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '15). ACM, New York, NY, USA, 401-411.
- [2] Mose Sakashita, Tatsuya Minagawa, Amy Koike, Ipei Suzuki, Keisuke Kawahara, and Yoichi Ochiai. 2017. You as a Puppet: Evaluation of Telepresence User Interface for Puppetry. In Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '17). ACM, New York, NY, USA, 217-228. DOI: <https://doi.org/10.1145/3126594.3126608>
- [3] Yoshinari Takegawa, Yutaka Tokuda, Akino Umezawa, Katsuhiko Suzuki, Katsutoshi Masai, Yuta Sugiura and Maki Sugimoto, Diego Martinez Plasencia, Sriram Subramanian, and Keiji Hirata. 2020. Digital Full-Face Mask Display with Expression Recognition using Embedded Photo Reflective Sensor Arrays. In 2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR). 101-108. <https://doi.org/10.1109/ISMAR50242.2020.00030>
- [4] Bruce H Denby, Tanja Schultz, Kiyoshi Honda, Thomas Hueber, James M Gilbert, and Jonathan S Brumberg. 2010. Silent speech interfaces. *Speech Communication* 52, 4 (2010), 270-287. <https://doi.org/10.1016/j.specom.2009.08.002> Silent Speech Interfaces.
- [5] Hyein Lee, Yoonji Kim, and Andrea Bianchi. 2020. MAScreen: Augmenting Speech with Visual Cues of Lip Motions, Facial Expressions, and Text Using a Wearable Display. In SIGGRAPH Asia 2020 Emerging Technologies (Virtual Event, Republic of Korea) (SA '20). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 2, 2 pages. <https://doi.org/10.1145/3415255.3422886>.
- [6] Hiraki Hirotaka and Jun Rekimoto. 2021. SilentMask: Mask-type Silent Speech Interface with Measurement of Mouth Movement. In Augmented Humans International Conference 2021 (AHs '21), February 22-24, 2021, Rovaniemi, Finland (Rovaniemi, Finland) (AHs '21). Association for Computing Machinery, Rovaniemi, Finland. <https://doi.org/10.1145/3458709.3458985>.
- [7] Yuxin Tong, Ziang Feng, Jongwoon Kim, John L. Robertson, Xiaoting Jia, and Blake N. Johnson. 2020. 3D printed stretchable triboelectric nanogenerator fibers and devices. *Nano Energy* 75 (2020), 104973. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104973>.
- [8] Yutarou Suzuk, Kodai Sekimori, Yuki Yamato, Yusuke Yamasaki, Buntarou Shizuki, and Shin Takahashi. 2020. A Mouth Gesture Interface Featuring a Mutual-Capacitance Sensor Embedded in a Surgical Mask. Human-Computer Interaction. Multimodal and Natural Interaction, Thematic Area, HCI 2020, Held as Part of the 22nd International Conference, HCII 2020,
- [9] Shusuke Kanazawa and Hirobumi Ushijima. 2020. Development of a Strain Sensor Matrix on Mobilized Flexible Substrate for the Imaging of Wind Pressure Distribution. *Micromachines* 11, 2 (2020). <https://doi.org/10.3390/mi11020232>.
- [10] Yongchao Tang, Zongbin Zhao, Han Hu, Yang Liu, Xuzhen Wang, Shanke Zhou, and Jieshan Qiu. 2015. Highly Stretchable and Ultrasensitive Strain Sensor Based on Reduced Graphene Oxide Microtubes-Elastomer Composite. *ACS Applied Materials & Interfaces* 7, 49 (2015), 27432-27439. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b09314> arXiv:<https://doi.org/10.1021/acsami.5b09314> PMID: 26595114.
- [11] Hanna Lee, Mary Glasper, Xinda li, John Nychka, Jane Batcheller, Hyun-joong Chung, and Yi Chen. 2018. Preparation of fabric strain sensor based on graphene for human motion monitoring. *Journal of Materials Science* 53 (06 2018). <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2194-7>.
- [12] Joseph Muth, Daniel Vogt, Ryan Truby, Yiğit Mengüç, David Kolesky, Robert Wood, and Jennifer Lewis. 2014. 3D Printing: Embedded 3D Printing of Strain Sensors within Highly Stretchable Elastomers (Adv. Mater. 36/2014). *Advanced materials* (Deerfield Beach, Fla.) 26 (09 2014). <https://doi.org/10.1002/adma.201400334>.