

鉄粉ボンドを手袋に塗布することによる 拡張可能なデータグローブの作製

山岸 真人^{1,a)} 高田 峻介¹

概要：本稿では、鉄粉とボンドを混ぜ合わせた導電性の物体（以降鉄粉ボンド）を、衣類や手袋に塗布することによる曲げ検出を用いたデータグローブを提案する。鉄粉ボンドは導電性、柔軟性を持ち、指を曲げ伸ばしすると抵抗値が変化する。この特性を利用し、曲げセンサとして利用可能である。ここでの鉄粉ボンドは完全に固まっている状態のことを指す。さらに、鉄粉ボンドは磁性体であるため、鉄粉ボンドを塗布した手袋は磁石のアタッチメントによる拡張が容易である。抵抗値の異なるアタッチメントを接続したり、接続する場所を変化させればアタッチメントの判別も可能である。本稿では鉄粉ボンドを手袋の曲げセンサとして実装し、抵抗値の変化や接続したアタッチメントの種類や位置の判別についての検証を行った。

1. はじめに

鉄粉とボンドを混ぜ合わせた「鉄粉ボンド」を手袋に塗布することで、指の曲げを検出する手法を提案する。鉄粉ボンドは導電性、柔軟性を持っており、曲げ伸ばしすると抵抗値が変化する（図1）。この特性を利用し、自由に形状を設定可能な曲げセンサとして活用する。また鉄粉ボンドは従来の導電性接着剤 [1] と異なり、磁性体であるため、磁石を用いてアタッチメントを装着できる。鉄粉ボンド表面から磁石を介してアタッチメントへ電流を流し、その抵抗値の変化からアタッチメントの種類やアタッチメントを装着した位置を判別する。提案手法はVRコントローラとしての活用を目指す。

2. 関連研究

指の曲げセンシングには圧電素子 [2]、導電繊維 [3]、光ファイバ [4]、超音波 [5] などが用いられている。これらの手法ではセンサとして用いる素子の形状があらかじめ決まっているため、自由にセンサ形状を設計することが難しい。提案手法はセンシングしたい場所に狙って鉄粉ボンドを塗布することで、自由に形状を設計できる。

Koelle らの研究 [6] では、導電性のバイオプラスチックを用いて曲げセンシングを行っている。バイオプラスチックは自由に形状を設計できる点で提案手法と近いが、提案手法で用いる鉄粉ボンドは磁性体であるため、磁石を用いてアタッチメントを装着するなど拡張性を持つ点で異なる。

アタッチメントを用いて拡張可能な研究として、メアンダコイル++ [7] が挙げられる。この手法ではアタッチメントを置くだけで容易に接続できるが、アタッチメントを固定することができない。また、Haconiwa [8]、岩崎らの研究 [9] では拡張用接続端子としてスナップボタンを用いている。これらの研究ではアタッチメントを固定できるが、スナップボタンのある位置にしか接続できず、拡張できる範囲があらかじめ決められている、接続に手間がかかるといった問題がある。提案手法は作製が容易であり、素材上のどこにでも接続、固定でき、アタッチメントを接続した際の抵抗値変化を用いてアタッチメントの種類や位置の判別を行うことができるという点で異なる。

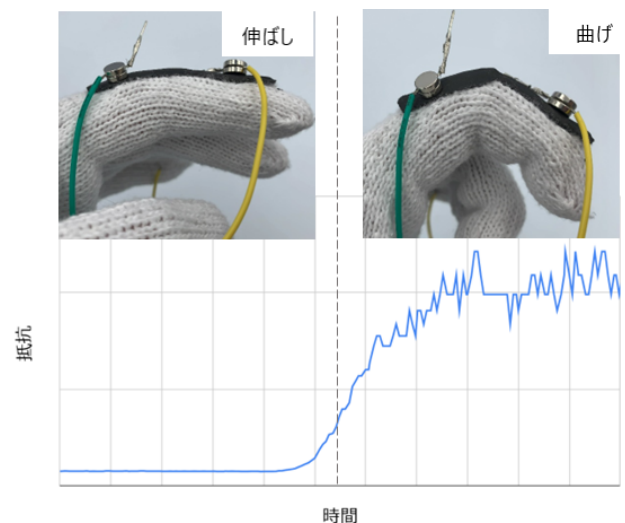


図1 提案手法

¹ 神戸市立工業高等専門学校 電子工学科

^{a)} r119335@g.kobe-kosen.ac.jp

3. 提案手法

提案手法の原理を以下に示す。

3.1 曲げセンサの原理

曲げセンサの原理を図2に示す。指を曲げることにより手袋の外側に塗布した鉄粉ボン드가引き延ばされ、断面積も小さくなる。したがって、式(1)に基づいて抵抗値が増加する。ここで、 ρ は抵抗率、 l は長さ、 S は断面積である。

$$R [\Omega] = \rho [\Omega \cdot m] \frac{l [m]}{S [m^2]} \quad (1)$$

3.2 アタッチメントの位置と種類判別の原理

アタッチメントの位置、種類を判別する原理を図3に示す。まず、アタッチメントを接続した位置を変化させると形成される並列回路の各抵抗値が変化し、アタッチメントにかかる電圧が変化する。その変化を読み取ることで位置を特定する。さらに、アタッチメントの種類でそれぞれ固有の抵抗値等の特性を持つため、アタッチメントにかかる電圧は変化する。その変化を読み取ることで種類を判別する。

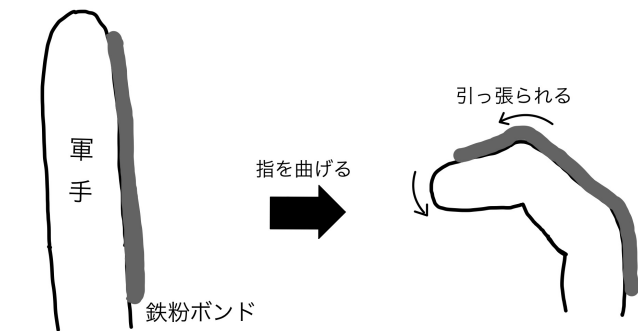


図2 曲げセンサの原理

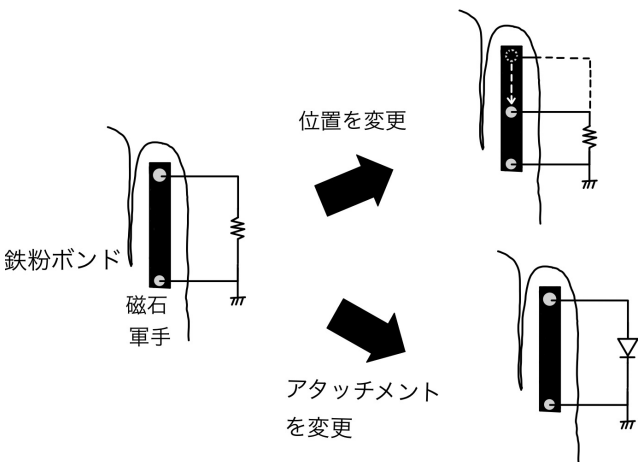


図3 アタッチメント接続の原理図

表1 抵抗値と経過時間

標本	体積比		経過時間(日)後の抵抗(kΩ)					
	鉄粉	ボンダ	1	2	3	4	5	6
a	5	5	0.83	0.11	×			
b	4	6	3.4	2.3	0.64	0.22	1.7	0.93
c	3	7	226	27.8	21.7	22.6	23.3	19.6
d	2	8	5300	×				

4. 実装

4.1 鉄粉ボンダの体積比の検討

鉄粉とボンダを混ぜ合わせることで、導電性、柔軟性を持った鉄粉ボンダを作製した。鉄粉には協和純薬工業株式会社の鉄粉#300(46 μ m)を使用し、ボンダにはセメダイン株式会社の木工用ボンダ[10]を使用した。

鉄粉ボンダの特性を調べるために、鉄粉とボンダの体積比を変えた表を4種類作製し比較した。ボンダ作製時から経過時間と抵抗値の関係を表1に示す。表1のとおり、標本aは鉄粉比率が高く、硬すぎたために3日目に標本が割れ、抵抗が測定不能になった。標本dは1日目の時点では抵抗値が高いものの電流を流していたが、2日目になると絶縁した。標本c、dは継続してある程度一定の抵抗を維持していた。

その後、標本c、dを曲げられるかの検証を行った。標本cは10回ほど90度に折り曲げることで割れてしまったが、標本dは100回以上折り曲げて割れることはなかった。よって一定の抵抗を維持しており、曲げることが可能である標本c(鉄粉:ボンダが3:7)をプロトタイプに使用した。

4.2 プロトタイプの作製

4.1節の実験を基に、鉄粉ボンダ(鉄粉:ボンダの体積比3:7)を用いて指の曲げセンシング可能か検証するためのプロトタイプを作製した。手袋は軍手を用い、人差し指部分に鉄粉ボンダを塗布した。曲げ計測にはArduino Duemilanoveを使用した。設計図を図4、実際のプロトタイプを図5に示す。

Arduinoを用いた分圧回路によって抵抗を測定できるように設計した。10k Ω の分圧抵抗を用いた。

5. 実験

指を曲げる、鉄粉ボンダへの押下、アタッチメントの接続の3つの実験を行った。

5.1 指を曲げた時の抵抗の変化

作製した鉄粉ボンダを塗布した手袋を着用した状態で人差し指を曲げ、抵抗値の変化を調べた。同時に曲げセンサを同じように曲げ、鉄粉ボンダとの変化の違いを調べ、結果をPythonで描画した。曲げセンサとして ALPHA-

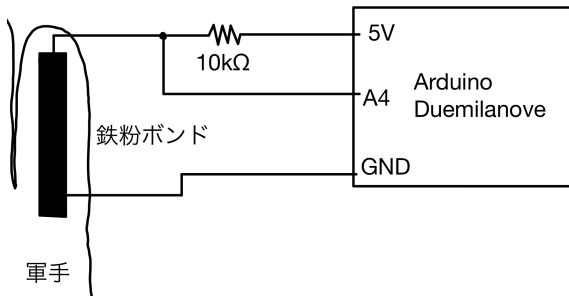


図 4 設計図

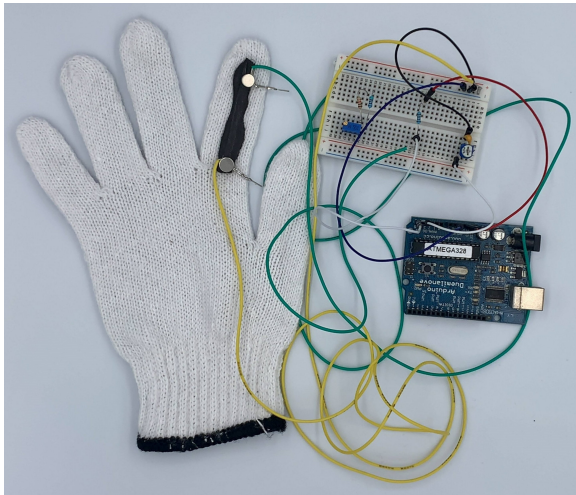


図 5 プロトタイプ

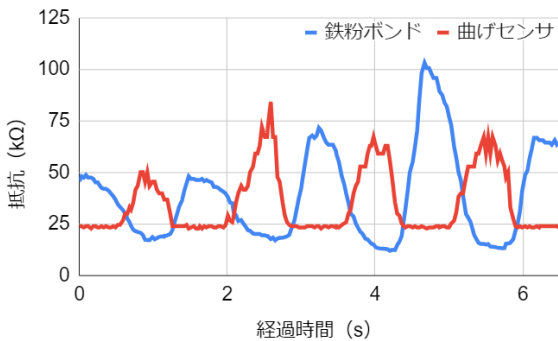


図 6 指を曲げた時の抵抗値の変化

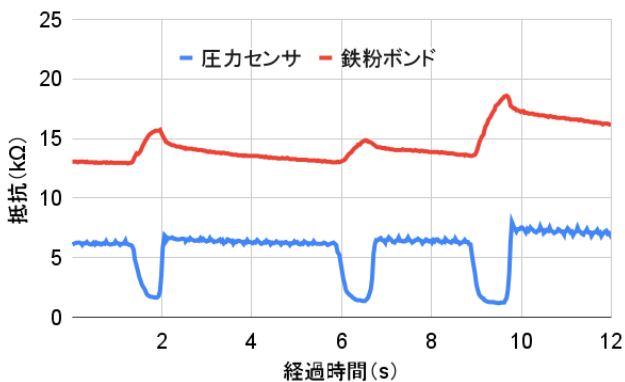


図 7 押下時の抵抗値の変化

MB090-N-221-A02 を用いた. 図 6 に鉄粉ボンドと曲げセンサの値の変化を示す.

指を曲げることにより鉄粉ボンドは抵抗値が小さくなり, 曲げセンサは抵抗値が大きくなった. センサの応答速度は鉄粉ボンド, 曲げセンサともに約 0.1 秒であった. 鉄粉ボンドは曲げセンサとして利用できることが分かった.

5.2 鉄粉ボンドへの押下時の抵抗の変化

作製した鉄粉ボンドを他の指で押し, 抵抗値の変化を調べた. 同時に圧力センサを同じように押し, 鉄粉ボンドとの変化の違いを調べ, 結果を Python で描画した. 圧力センサとして ALPHA-MF01-N-221-A01 を用いた. 図 7 に鉄粉ボンドと圧力センサの値の変化を示す.

押下によって鉄粉ボンドは抵抗値が大きくなり, 圧力センサは抵抗値が小さくなった, 押下した鉄粉ボンドを離したとき, 圧力センサと比べて値が戻りにくかった. 押下間隔をあげなければならないという点を除けば, 鉄粉ボンドは圧力センサとして利用できることが分かった.

5.3 磁石でアタッチメントを接続

5.3.1 アタッチメントの位置

鉄粉ボンドにアタッチメントを接続し, 接続する場所を変化させることによる抵抗値と電圧の変化を調べた. 今回はアタッチメントとして $5k\Omega$ の抵抗を使用した. アタッチメントの位置は GND から 1cm-3cm で変化させ, 結果を Python で描画した. 回路図を図 8, 抵抗値と電圧の変化を図 9 に示す. アタッチメントの位置を変化させることによって抵抗値, 電圧値がともに変化した. 位置を変化してから値が変化するまで 100-200 秒の遅延が生じた.

5.3.2 アタッチメントの種類

鉄粉ボンドに様々な種類のアタッチメントを接続し, アタッチメントにかかる電圧の変化を調べた. 今回はアタッチメントとして, $5k\Omega$ 抵抗, 可変抵抗, LED (赤, 白, 緑, 青), 曲げセンサ, 圧力センサを用いた. 接続図を図 10 に示す. アタッチメントの位置は GND から 3cm で固定し, 結果を Python で描画した. 各アタッチメントを接続したときの変化を図 11, 図 12 に示す.

曲げセンサ, 圧力センサは 15 秒経過時に押す, 曲げる動作を行った. 可変抵抗は 15 秒経過時に抵抗値を変化させた. LED は全て弱く光り, 各 LED, アタッチメントはともに固有の電圧値を持った. ここで各 LED の電圧値が異なるのは, LED の順電圧が色によって異なるからである. センサや可変抵抗は接続した状態でも機能することが分かった.

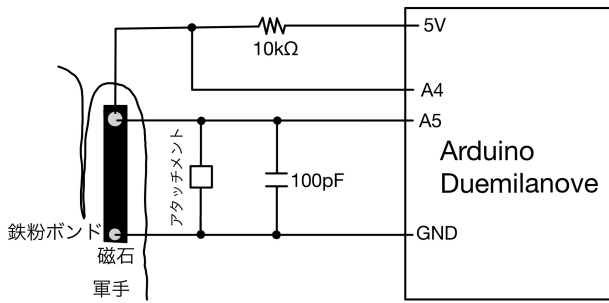


図 8 アタッチメントの回路図

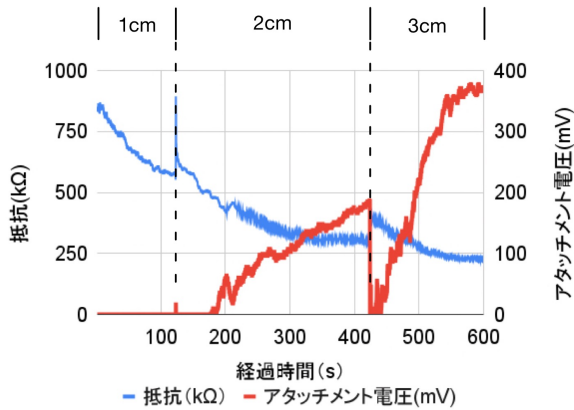


図 9 アタッチメントの位置を変化させたときの抵抗と電圧の変化

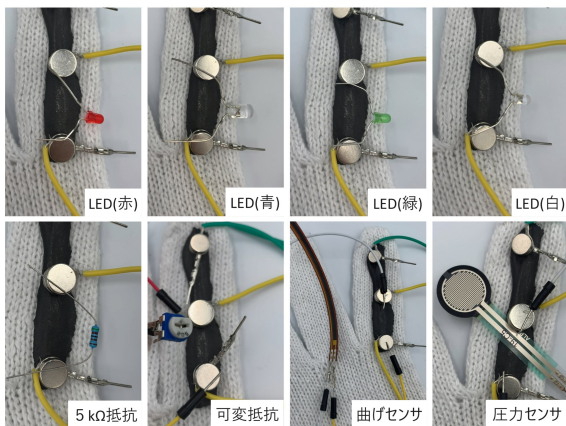


図 10 アタッチメントの接続図

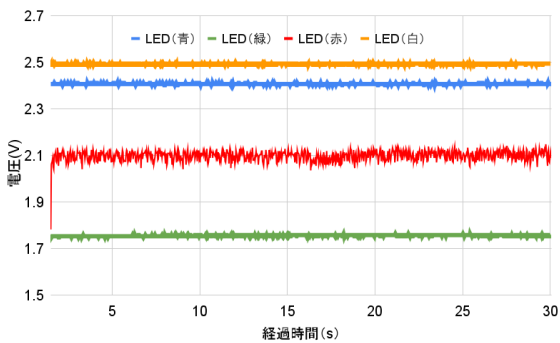


図 11 様々な LED を接続したときの電圧値変化

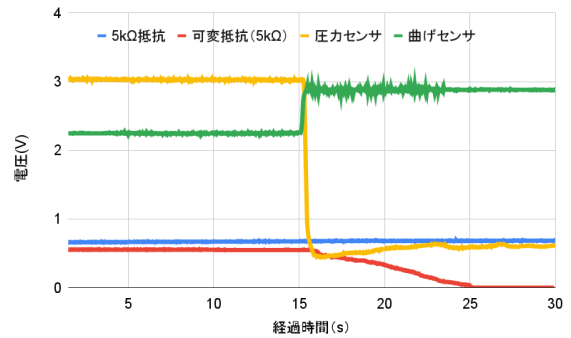


図 12 様々なセンサ, 抵抗を接続したときの電圧の変化

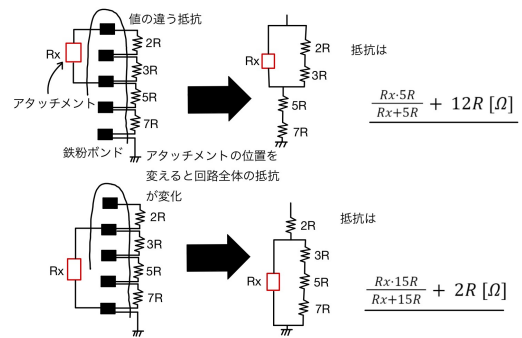


図 13 改良案

6. 応用例

これらの検証結果より、鉄粉ボンドを用いたデータグローブでは以下の3つのことが行える。

- 手の動きを検出
- タップやスワイプなどの入力を判別
- アタッチメントの接続と認識

これらを用いた VR アプリケーションでは、ジェスチャを認識するだけでなく、タップでメニューを開いたり、スワイプで音量の調節を行うことができる。さらに、アプリケーションの種類に応じて振動フィードバック、コントローラなどの機能を容易に拡張することもできる。

7. 課題と議論

7.1 アタッチメントの位置判別時の遅延

アタッチメントの位置を判別する際、遅延が生じる。さらに素子の片方を GND に固定しなければならない。

この問題を解決するための改良案を図 13 に示す。鉄粉ボンドを分割し、それぞれ違う値の抵抗を接続する。それによって分割した鉄粉ボンドを座標として認識でき、アタッチメントをどの点に接続したかを、どの抵抗が並列接続されているかで全体抵抗が変化することによって判別することができる。

遅延の原因となっている鉄粉の代わりに判別条件に抵抗を用いることによって、遅延を減らすことができると考える。

7.2 鉄粉ボンドの時間経過による抵抗値の変化

鉄粉ボンド作製時に時間経過によって抵抗値が変化したが、それには以下のような理由が予想される。

- ボンドが固まっていない（水分が残っている）ことによる抵抗値の変化
- 鉄の酸化による抵抗値の変化

現時点では詳しい原因はわかっていないが、デバイスの作製とともに原因を調査する。

7.3 指を曲げた時の抵抗値の減少

3.1 節で示したように、鉄粉ボンドを曲げると引き延ばされ、断面積が減少するため抵抗値は増加するはずである。しかし、5.1 節の図 6 で示すように抵抗値は減少した。

鉄粉ボンドは鉄粉とボンドの混合物であり、ここで用いているボンド [10] は酢酸ビニル樹脂を水に分散（エマルジョン化）したものである。乾燥した酢酸ビニル樹脂エマルジョンは小さな空洞が多数存在する構造となっている [11]。本実験では指を曲げたことで空洞がなくなり抵抗率が減少し、その変化が長さや断面積の変化よりも大きかったのではないかと考えられる。

7.4 材料の検討

本研究では鉄粉：ボンドの体積比を 2:8 にすると絶縁した。しかし、柔軟性の点でいえば鉄粉の比率が少ない方が柔らかくなり、手袋に塗布した場合に曲げやすい。そのため鉄粉ボンドをより柔らかくすることができないか考える。鉄粉以外に銅などの導電性の高い物質を混ぜる、ボンドの種類をより柔らかいものに変更する案がある。これらの案を今後実験し、適した材料を調査する。

8. まとめ

本稿は、導電性を持つ、形状変化を自由に設計可能、磁性体であるといった特徴を持つ鉄粉ボンドを使用したデータグローブを提案した。本研究より、鉄粉ボンドを塗布した手袋を着用し指を曲げる、鉄粉ボンドへの押下で抵抗値が変化することが分かった。さらに、鉄粉ボンドに磁石でアタッチメントを接続でき、接続する位置、アタッチメントの種類で抵抗値が変化することが分かった。提案手法を利用することで、手の動きを認識するだけでなく、アタッチメントを容易に接続でき、その種類、位置を認識できるグローブを作製可能である。今後はアタッチメントの位置を判断する際の遅延時間の解決、特性の良い材料の調査を行う。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP22K17941 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 菅沼克昭. 導電性接着剤技術. 精密工学会誌, 79(8):730–734, 2013.
- [2] Srijan Bhattacharya, Siladitya Khan, Tanmoy Sil, Bikash Bepari, and Subhasis Bhaumik. Ipmc based data glove for finger motion capturing. In *Proceedings of the 2015 Conference on Advances In Robotics*, AIR '15, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [3] Ryosuke Takada, Junichiro Kadomoto, and Buntarou Shizuki. A sensing technique for data glove using conductive fiber. In *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '19, pages 1–4, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [4] 大西 正敏, 田宮 直, and 野村 由司彦. Mg324 光ファイバ型曲げセンサを用いた関節角計測装置に関する検討 (mg32 センサ, あたり前のことを知る). 福祉工学シンポジウム講演論文集, 2007:254–255, 2007.
- [5] Carlos E. Tejada, Jess McIntosh, Klaes Alexander Bergen, Sebastian Boring, Daniel Ashbrook, and Asier Marzo. Echotube: Robust touch sensing along flexible tubes using waveguided ultrasound. In *Proceedings of the 2019 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, ISS '19, pages 147–155, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [6] Marion Koelle, Madalina Nicolae, Aditya Shekhar Nit-tala, Marc Teyssier, and Jürgen Steimle. Prototyping soft devices with interactive bioplastics. In *Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '22, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [7] 高橋 亮, 雪田 和歌子, 横田 知之, 染谷 隆夫, and 川原 圭博. メアンダコイル++ : 継続的なウェアラブルコンピュータのための安全で効率的な衣類コイルによる無線給電. コンピュータ ソフトウェア, 40(3):3.113–3.122, 2023.
- [8] Saki Sakaguchi, Sayaka Shimada, Nanae Shirozu, and Mitsunori Matsushita. Haconiwa: A toolkit for introducing novice users to electronic circuits. In *2015 IEEE 4th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, pages 531–532. IEEE, 2015.
- [9] 岩崎聖夜, 阪口紗季, and 松下光範. 構成変更が可能な柔らかいタッチインタフェースにおけるインタラクション方式の拡張. 情報処理学会研究報告, 2016(4):1–7, 2016.
- [10] セメダイン株式会社. 木工用接着剤シリーズ, 2023. <https://www.cemedine.co.jp/home/adhesive/woodbond/index.html> (Accessed: 2023/12/18).
- [11] 折口 俊樹, 内田 真由美, and 清水 祐介. ノン voc 型酢酸ビニル樹脂エマルジョン. 日本接着学会誌, 41(11):430–435, 2005.