

令和 6 年 5 月 13 日現在

機関番号：34304

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K11780

研究課題名（和文）金属箔回路を活用したセンサネットワークの構築

研究課題名（英文）Construction of a sensor network using metallic leaf circuits

研究代表者

瀬川 典久（Segawa, Norihisa）

京都産業大学・情報理工学部・教授

研究者番号：20305311

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：1)3D printerとフレキシブル基板を用いた多層回路の構築を行った。部品を装着する外装を3D printerで出力する。また、その外装に印刷した回路を多層的に挿入することで多層回路を構築する。また、外装そのものを曲げられる素材を用いることで、回路そのものを曲げることが可能になる。2)PPCフィルム、アクリル板の表面に直接回路を生成するために、金属箔がフィルムに接着されている製品をもちい、直接レーザーカッターのレーザーを用いて、PPCフィルム、アクリル板の上に金属箔を転写して回路を構築した。3)本手法を用い、電気筋肉刺激（EMS）に応用した。本手法で構築した金属箔回路を電極として利用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

1.一般的に多層回路の試作を行う際、ブレッドボードでつくることはほぼ不可能であり、外部の基板作成メーカーに試作をお願いする。現在では、かなり安く試作が可能であるが、3Dプリンタで多層回路を構築することができると、制作者自身の手元で多層基板を利用したプロトタイプシステムが可能になるメリットがある。2.アクリル板、PPCフィルム上に金属箔回路の構築が可能になることで、さまざまな応用が考えられる。PPCフィルムは、従来の銀ナノインクでの回路作成も可能であるが、金属箔をもちいることで、回路表面に部品を装着（はんだづけ）することが可能になる。

研究成果の概要（英文）：1. I constructed a multilayer circuit using a 3D printer and a flexible substrate. The casing for mounting the components was output using a 3D printer. By inserting the printed circuit into this casing in multiple layers, a multilayer circuit is constructed. Furthermore, by using a material that can bend the casing itself, it becomes possible to bend the circuit itself. 2. In order to generate circuits directly on the surface of PPC film and acrylic plates, I used a product with metal foil adhered to the film, and used the laser of a laser cutter directly to transfer the metal foil onto the PPC film and acrylic plates to construct the circuit. 3. I applied this method to electrical muscle stimulation (EMS). The metal foil circuit constructed using this method was used as an electrode.

研究分野：デジタルファブリケーション

キーワード：デジタルファブリケーション センサ

1. 研究開始当初の背景

近年、一般家庭向け IoT 機器が低価格で発売され、利用が可能になっている。具体的には、無線 LAN でコントロールできる照明機器、スマートスピーカ等があげられる。一方、3D プリンタ、レーザカッターが、数年前までは、個人では手に入らない物であったのが、近年の開発により、数万円で入手が可能で、小学生から物作りを行うようになってきている。3次元プリンタ、レーザカッター技術の普及により、現在よりも容易にデジタルファブリケーションが行われると考えている。その結果、デジタルファブリケーション技術を活用して、IoT 技術を一般家庭でなじませて利用したい必要性が高まると考えている。現在、これらの技術の進歩に対して、ユーザが容易に回路を作成して、センサノードを開発する仕組みを提供する必要がある。従来は、ユーザが必要とするセンサモジュールを、交換して利用する、または、ユニバーサル基板を活用するもしくは、プリント基板を作成し、センサを利用する手法が主であった。センサモジュールを交換する手法は、ユーザがハードウェア制作をする必要はないが、利用するセンサの種類が制限されてしまう。後者の基板を制作する手法は、その基板を制作する時間コスト、制作コストが高くつく欠点がある。様々な環境でセンサノードを開発するためには、その環境に応じたセンサノードを自作する必要がある。そのためには、数多くの施策が必要になると考えられるが、その試作を容易に行う仕組みが必要になる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、金属箔を用いて作成できる金箔回路技術とセンサネットワーク技術を統合させ、従来作成するのが困難であった、新しい IoT 機器を創造することである。金属回路技術は、従来回路を構築するのが難しかった、紙、木材、布の上に金属箔を貼り付け回路を構築する技術である(図 1)。本技術は、レーザプリンタで印刷した回路に市販のアイロンを用い接着させて回路を構築する仕組みである。また、銅箔を活用することで、部品を直接ハンダ付けすることが可能である。図 1 の右図は、布の上に表面実装 LED、抵抗、および電池ボックスを実装した物である。銀ナノインクでの実装とは異なり、表面上に直接半田付けできることは、センサを容易に取り付けることができることを示す。本技術を活用することで、紙、布、木材の上に金属箔を貼り付けることで、電子回路を生成し動作させることが可能になる。新しい素材の上に作られた回路を工夫し、さまざまな新しいセンサとして構築し、従来とは全く利用方法が異なるセンサネットワークを構築することが目的である。



図 1 左：レーザプリンタを利用した紙の上の回路 中央：トナー転写用紙を利用した木材への実装 右：布を活用した回路例

3. 研究の方法

(1)従来開発しているセンサネットワークノードと金属箔回路を組み合わせて、機器の試作を行う。

研究室で開発を行ったコンセプトモデルを改良し、あたらしいセンサノードの作成を目指す。実装方法は、アナログ、デジタル入出力、無線機能が組み込まれているマイコンと本技術を組み合わせ、システムを構築する。

また、金属箔を活用する手段も、新たに開発する。レーザプリンタを用いて金属箔を接着する手法は、簡単に回路を作成することが可能になる。しかし、アイロンを用い、トナーを溶かして接着するために、対象となる物体が、アイロンの熱(160)に耐えれないといけない。そのため、対象となる物質に制限がある。そこで、漆を活用し、金属箔を容易に接着する手法を開発す

る。

(2)本技術を活用し、さまざまな試作品の構築を行い、その試作品の評価によって本手法の有効性を確認する。

具体的には、以下の2点を行う。

(a)家庭内での利用

第1年度の技術を活用し、本技術を一般家庭に存在する家具、建具に対して適用し、家庭内のデータが取得できるかどうかを評価する。また、試作品の耐久性、操作性を評価し、通常の生活になじむものなのかを評価を行い、本手法の有効性を確認する。

(b)研究協力者と共同制作

研究協力者に、本技術を提供し、研究協力者と共に、さまざまな試作品を構築する。本技術は、回路制作コストが従来に比べて安く、また制作時間が短くなるためにさまざまな種類の試作が、多数制作することが可能になる。その試作品の有効性を評価することで、本手法の有効性を評価する。

4. 研究成果

(1) 3D printer とフレキシブル基板を用いた多層回路の構築

また、一方、銀ナノインク回路、金属箔回路などの研究開発が進んだことにより、様々な素材に回路を作成することができるようになった。これらは、従来のプリント基板制作とは異なり、印刷技術を用いて回路を作成することが可能になっており、従来に比べて、非常に高速に回路を作成することが可能になっている。特に、銀ナノインクは、さまざまなデジタルファブリケーションに活用されている。

しかし、回路として応用するためには、部品を装着しなければならないのであるが、部品は一般的に硬く、曲がらないために、銀ナノインク回路や金属箔回路などと相性があまりよくないことがわかっている。具体的には、布地に生成した回路に、LEDライト・電池ボックスなどをはんだ付けで実装した場合、布の曲げる方向によっては、はんだの硬さと布地の回路の柔らかさが違うため、布に作った回路は曲がるが、はんだがその曲げについていけないために、そこで回路が外れてしまう。

本研究では、前述の印刷回路に容易に部品を装着するために、部品を装着する外装を3D printerで出力する。また、その外装に印刷した回路を多層的に挿入することで多層回路を構築する。また、外装そのものを曲げられる素材を用いることで、回路そのものを曲げることが可能になる。

(a) 3D printer による軟質なフィラメントを用いた外装の実装

曲げられる多層基板を構築するために、まずは、3D CADをつかい、厚さ1mm奥行き3cm程度の穴を複数あける図面を作成した(図2)。その図面をstlに変換し、3Dプリンタのスライサ(Cura)でスライスし、TPU材(recreus社製Filaflex 60A)で出力した(図3)。出力プリンタは、Ultimaker社製Ultimaker S5である。TPUの出力パラメータだと出力できないため、出力速度をぎりぎりまで下げることで出力に成功した。穴を空けたときのサポート材は、TPUが柔らかいためすぐに取り除くことができた。

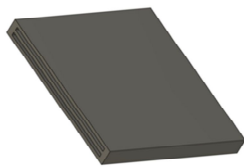


図2 3D CADでの多層図面の作成



図3: TPU材での出力

(b)多層回路に導入する金属箔回路の作成

従来研究の手法で、曲げられる素材(紙など)の表面に金属箔回路を作成する。回路図をコンピ

ユー上で作成し、その回路図をパターンに変換し、レーザプリンタで印刷する。印刷された回路パターンの上に金属箔をのせ、アイロンで圧着する。印刷された回路パターンにはトナーがあり、そのトナーの中に含まれている接着成分で、金属箔が紙に接着し、回路が紙の上に完成する。本研究では、多層を実現するため回路に穴をあけるために、紙の上に回路を作成する。層の数だけ、回路を作成する。

(c) 曲げられる多層回路の実現

(b)で作成した紙の上に生成した回路を(a)の穴の中に挿入し、多層回路を実現する。単純例として、多層回路でLEDを光らせる回路を作成した。図4左が、概要図で、図4右が実装例である。図5の通りに、ピンを通すことで多層を実現している。穴が開いた部分は、接続がされていないため、問題なく動作する。また、全体をまげて、動作することも確認している。(ただし、ピンと回路の接触が壊れた場合動作しなくなる。)

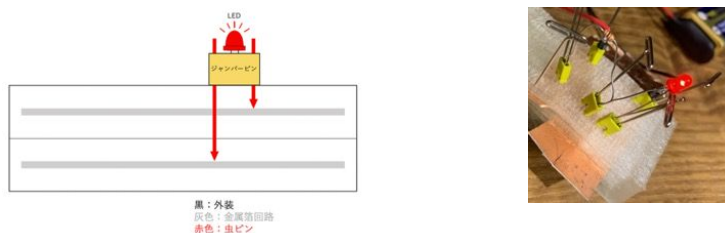


図4左：多層回路の実現

右:実装例

本手法を用いることで、簡単に軟質な多層回路を構築することができる。図5は、軟質な多層回路を用いて、コンデンサを構築したものである。軟質な多層回路の性質を利用することで、表面の圧力に応じて、コンデンサの静電容量が変化していることがわかる。この性質で、一種の圧力センサを、物質内に構築することが可能になっている。圧力センサを外付けにするのではなく、3Dプリンタで出力された物体に、圧力センサを組み込むことが可能になると考えられる。

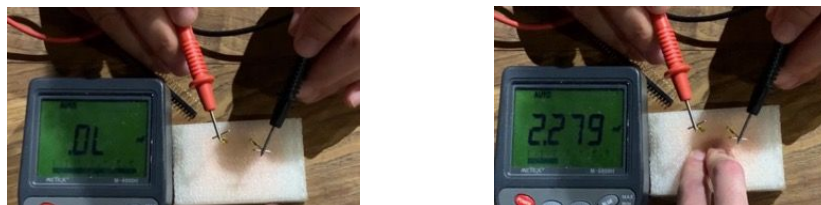


図5左：本手法を用いたコンデンサ（距離が遠すぎてコンデンサとして働いていない。）

図5右:左図に対して、表面に圧力かける。テスターを用い、静電容量が計測できている。

(2) 導電性銀箔とレーザカッターを用いた回路構築

従来手法では、あらかじめ、レーザプリンタで回路図を出力し、その出力された回路図に重ねて金箔を置く。そしてそれをアイロンで熱圧着をすると、レーザプリンタのトナーに金箔が接着し、回路が構築される仕組みとなっている(図4)。しかし、PPC用フィルムやアクリル板対しての転写が不可能であった。

これは、PPC用フィルムでは、熱によって表面が溶けてしまい、全体に回路が生成されるためである。また、アクリル板では、トナーの転写を行うとき、アクリル板の表面に固着しないため、金属箔が接着しない性質がある。

そこで、本実験では、金属箔がフィルムに接着されている製品をもちい、直接レーザカッターのレーザを用いて、物質上に金属箔を転写して、回路を生成する(図6)。

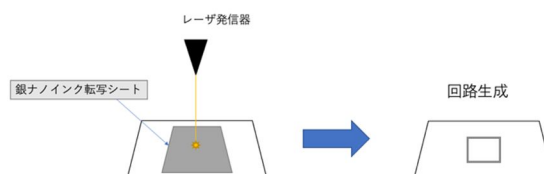


図6：レーザカッターのレーザを用いた導電箔の転写

本実験で用いた金属箔は、導電性転写フィルム MG-85（村田金箔社製）である（図7）。本フィルムは、接着層、蒸着層が転写フィルム、着色層が導電層、離型層、ベースフィルムが OPP 保護フィルムである。電気特性は、導電性転写フィルムの単位面積(1cm²)当たりの表面抵抗値である表面抵抗率 ρ_s は $9.79e^{-2}$ [Ω/sq] である。また、導電箔の単位体積(1cm³)の体積抵抗値は $9.79e^{-5}$ [Ω/cm] である。

【構成】	OPP保護フィルム	約40 μm
	導電層(銀80%)	約10 μm
	#25転写フィルム	約25 μm

図7：MG-85の構造

レーザーカッターは、FLUX社製の Beambox-Pro の CO2 レーザーを使用した。このレーザーカッターの最大レーザー出力は 50W である。

実験結果は、図8の通りである。回路の線の太さを 0.5mm にし、出力 16.1[%]、速度 50[mm/秒]、回数は 11[回]の時に回路を生成することに成功した。抵抗値も、1.0~1.2[Ω/3cm]と安定していた。

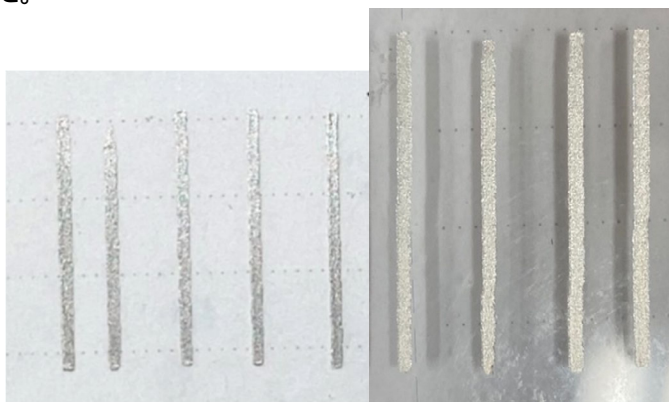


図8：実験結果（左、PPCフィルム、右アクリル板）

これらの結果から、従来手法では構築できなかった、PPC、アクリル板の上で回路を構築することが可能になった。また、PC用フィルムに回路構築したことより、この回路は曲げることができると確認できた。このことより、構築した回路をウェアラブル機器に応用できるのではないかと考えている。

(3)導電性ファブリックを利用した電気筋肉刺激（EMS）回路を用いた応用実験

手に装着できる回路を用い、電気筋肉刺激（EMS）に応用した。本手法で構築した金属箔回路を電極として利用した。電気筋肉刺激（EMS）は、「Electrical Muscle Stimulation」の略で、直訳すると「電気的な筋肉への刺激」を意味する。具体的には、筋肉に電気刺激を与え、断続的に収縮させることで、自分の意志とは関係なく筋肉を動かす機械を指す。通常は、リハビリ、プロスポーツ選手のトレーニングおよびダイエットに使われているが、エンターテインメントコンピューティングに応用することを目指している。（ただ、本プロジェクトで試作した電極は、安全性評価を行っていないために、評価実験では用いなかった。）

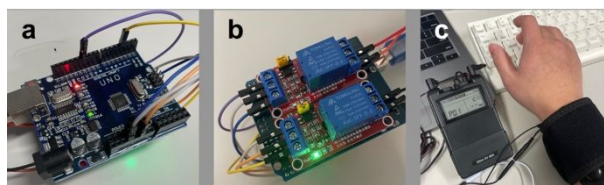


図9：EMS装置（左、Arduinoコントローラ、中EMS制御回路 右EMS電極装着）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Zhou Shuo, Segawa Norihisa	4. 巻 7
2. 論文標題 Method of Electrical Muscle Stimulation for Training FPS Game Players in the Timing of Shots	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction	6. 最初と最後の頁 1234 ~ 1252
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3611067	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 竹内 佑太郎, 瀬川 典久
2. 発表標題 Open-CV AIカメラを活用した入山者管理システムの構築
3. 学会等名 人工知能学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高田莉子, 高垣泰地, 瀬川典久
2. 発表標題 骨格推定と組込マイコンを活用したLED衣装のシミュレーションシステムの構築
3. 学会等名 日本ソフトウェア科学会 WISS2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 周鎌, 瀬川典久
2. 発表標題 筋電センサを用いる音楽ゲームのコントロールシステムの構築
3. 学会等名 日本ソフトウェア科学会 WISS2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大塚眞柊 , 瀬川典久
2. 発表標題 HMD装着時のVR環境内での動的な視野角の変化を用いた歩行可能なVR空間の拡張
3. 学会等名 日本ソフトウェア科学会 WISS2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土屋 圭佑 , 瀬川典久
2. 発表標題 3Dプリンタを活用したスパイクカスタマイズシステムの構築
3. 学会等名 Ubiquitous Wearable Workshop 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Zhou Shuo, Segawa Norihisa
2. 発表標題 Method for Music Game Control Using Myoelectric Sensors
3. 学会等名 21st IFIP TC 14 International Conference, ICEC 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shuo Zhou, Norihisa Segawa
2. 発表標題 Optimization of First-Person Shooter Game Control Using Heart Rate Sensor
3. 学会等名 20th IFIP TC 14 International Conference, ICEC 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 周鏢, 瀬川典久
2. 発表標題 心拍センサーを活用したFPSゲームコントロール最適化の提案
3. 学会等名 日本ソフトウェア科学会 WISS
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本時寛, 山本時寛, 瀬川典久, 石塚裕己
2. 発表標題 3D printerとフレキシブル基板を用いた多層回路の構築
3. 学会等名 日本ソフトウェア科学会 WISS
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 橘 優理子, 竹内 佑太郎, 瀬川 典久
2. 発表標題 組み込みシステムとカメラを用いたCOVID-19のための身体的距離モニタリングシステムの提案
3. 学会等名 人工知能学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuriko Tachibana and Norihisa Segawa
2. 発表標題 Physical distance monitoring system for COVID-19 using raspberry Pi and a monocular camera
3. 学会等名 the 18th Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '20) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤川昌之, 瀬川典久
2. 発表標題 軟性樹脂と導電性樹脂を用いた圧力検出可能なインソールの作成
3. 学会等名 ユビキタスウェアラブルワークショップ2020(UWW2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹内佑太郎, 橘優理子, 瀬川典久
2. 発表標題 ラズベリーパイカメラを用いたCovid-19のためのソーシャルディスタンスモニタリングシステムの提案
3. 学会等名 ユビキタスウェアラブルワークショップ2020(UWW2020)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	周 鏞 (Shuo Zhou)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------