

3D プリントと転写箔を用いた両面基板の製作手法

今井 悠平^{1,a)} 加藤 邦拓^{2,b)} 瀬川 典久^{3,c)} 真鍋 宏幸^{1,d)}

概要: 両面電子回路基板は、片面基板では実現できない複雑な配線を可能にする。両面の電子回路基板を個人で容易に作れるようになれば、個人によるモノづくりの幅を大きく広げることができる。本稿では、我々が提案した 3D プリントと金属転写箔を使用した電子配線印刷手法を発展させ、両面の基板を作る手法を提案する。両面基板に必須であるビアを、低融点半田を用いて製作する。PLA 樹脂をはじめとした様々な素材を基材として、金属転写箔と低融点半田を用いて両面基板を製作した。製作した両面基板に電子部品を実装し、電子回路が動作することを確認した。

1. はじめに

パーソナルファブリケーションが注目されている [1], [2], [3]。個人によるモノづくりが容易に行えるようになれば、自分の希望に合ったものをすぐに作れるようになる。近年、モノづくりのための機材を個人で入手しやすくなってきている。例えば、家庭用レーザーカッターや 3D プリントなど、物体の造形や切削をするための装置が比較的安価に購入できるようになった。将来的にはこれらの機材が多くのご家庭に普及し、個人でのモノづくりが一般化していくと予想する。

レーザーカッターや 3D プリントを用いれば、物理的な形状を自由に作れるが、作った物体により高度なインタラクションを加えるには、電子回路が不可欠になってくる。市販のモジュール (Arduino や Raspberry pi など) を購入し、造形物に組み込む方法があるが、単純な回路を物体に組み込むときや、特殊な形状の基板が必要な時には、これらのモジュールはあまり適していない。モジュールに搭載されている機能が過剰であり、さらに形状が限られている為、デザイン上の制約を受けてしまうからである。電子配線を構築する方法として、高価な機械を使用する方法や、化学薬品を用いた面倒なプロセスを経る方法などがあるが、これらの方法は誰もが簡単にできるものではない。電子配線を比較的容易に製作する方法が過去に提案されているが、専用の紙の上や、3D プリントで造形した物体に組

み込むことしかできず、適用範囲が限られている。

簡単に電子配線を作成する手法として、我々は 3D プリントと金属転写箔を使用した電子配線の印刷手法を提案してきた [4]。この手法では、様々な素材の平面に電子配線を印刷することができる。

本稿では、この手法を応用して様々な素材を基材にし、両面基板を製作する手法を提案する。両面基板は、片面基板ではできない複雑な配線を可能にする。さらに提案手法は様々な素材に対して両面電子基板を実装できるため、デザインの幅を広げることが期待される。

2. 関連手法

2.1 通常の基板製作

電子基板は通常、紙フェノールやガラスエポキシを基材として使用する。電子プリント基板を自作するには、多くの材料 (例えば、現像液やエッチング液、アルコール、フラックス、紫外線感光光源、ドリルなど) が必要になる (図 2)。基本的な片面電子プリント基板製作の手順は以下の通りである [5]。

- (1) パターン図を作成し、トレーシングペーパーに印刷する。
- (2) 印刷したトレーシングペーパーのパターンと市販の感光基板を露光用のホルダーセットに挟んで固定し、紫外線の光源を使用して直接露光する。
- (3) めるま湯で溶かした現像液に露光が終わった感光基板を浸す。
- (4) 現像後、間をあげずにエッチング処理を行う。バットに塩化第二鉄液を入れ、湯せんをして温めながら基板を浸す (図 3a)。
- (5) エッチング処理が終わった基板をアルコールで拭き、

¹ 芝浦工業大学
² 東京工科大学
³ 京都産業大学
a) ma20009@shibaura-it.ac.jp
b) kkunihir@acm.org
c) sega@acm.org
d) manabehirokyu@acm.org

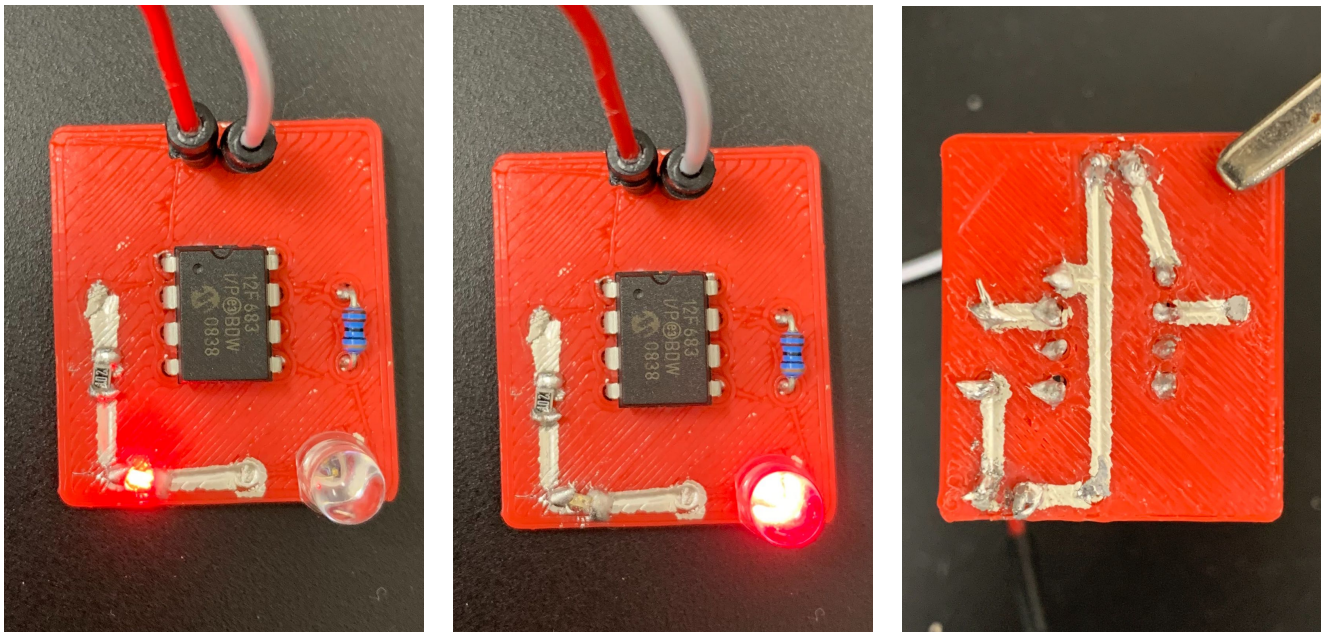


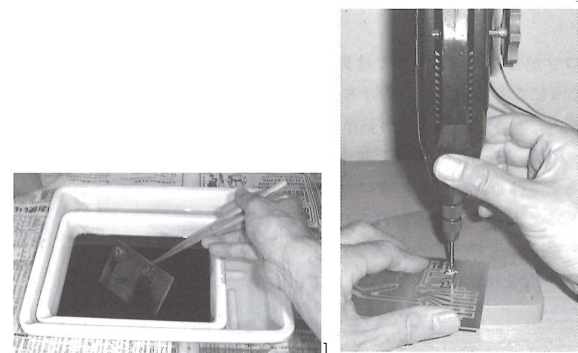
図 1: PLA 樹脂で製作した基板に対して電子部品を実装した電子回路. 左: 表面実装用 LED が点灯している様子, 中: 砲弾型 LED が点灯している様子, 右: 基板の裏面.

写真4.3.2 薬品類



現像剤 エッチング メチルアルコール フラックス

図 2: 通常の基板製作に必要な薬品の例. (文献 [5] より引用)



(a) エッチング処理. (b) ドリルでの穴あけ

図 3: 通常の基板製作に必要な手順の例 (文献 [5] より引用).

感光剤を除去する.

(6) ドリルを使い, 基板に穴を開ける (図 3b).

(7) 基板の表面にフラックスを塗布して仕上げる.

また両面基板は, 前述の手順を両面で行いつつ, 表裏の配線パターンを正確合わせなければならない. このように, 通常の基板製作では多くの材料と, 多くの煩雑な手順が必要である [5].

さらに, 表裏の配線を接続するスルーホールやビアの作成 (ドリルでの穴あけ加工や, メッキ工程など) にはさらに多くの処理を必要とし, 個人での製作には向いていない. 以上の手順を工業的に行うことはできるが, 両面基板の製作コストは片面基板の 2 倍以上である.

2.2 片面基板製作に関する研究

片面基板の製作手法の一つとして, 導電性インクを使用する手法が Kawahara らより提案されている [6]. これは, 専用紙と市販のインクジェットプリンタ, 特殊なインクを使用して電子配線を印刷する片面基板のラピッドプロ

トタイピング手法である. 導電性インクを搭載したインクジェットプリンタを用いて, 専用の用紙の上に配線パターンを印刷することで, 印刷された紙が片面プリント基板になる. 電子部品の実装には, 導電性の接着剤を使用する.

また, 導電性インクと水圧転写技術を組み合わせて曲面にも配線を印刷する手法が, Groeger らにより提案されている [7].

Espalin らは, FDM 方式 3D プリンタ 2 台と, CNC ルータを利用して, 電子回路や電子部品を搭載した 3D オブジェクトを製作する multi3D system を提案している [8]. また, 特殊な 3D プリンタ*1を使用することで, PLA フィラメントと導電インクを組み合わせ, 電子回路を含むオブジェクトを製作することもできる. これらの手法に共通す

*1 例えば, Voxel8

るのは、電子回路基板を製作するために特殊な装置や3Dプリンタを使用していることである。これらの機器を個人で利用できれば、電子回路基板の製作はより簡単にできるようになるが、そのような機器は、個人で利用するにはあまりにも高価であった。

片面基板の製作手法として他にも、金箔を使用した電子配線の製作手法がいくつか提案されている [9], [10], [11]。金箔は、酸化しにくく、科学的に安定している。さらに、延性に富んでいるため、曲げにも強い。しかし、特別な処理をされていない純粋な金箔は、指に少しでも触れたり、風に当たると箔の薄さが原因で破損してしまうため、取り扱いに細心の注意を払う必要がある。

2.3 両面基板製作に関する研究

kawahara による片面基板製作の手法 [12] を発展させて、両面基板のラピットプロトタイプング手法が提案されている。専用紙上のビアを作りた部分にドリルで穴を開け、両面から配線を印刷してビアを形成する手法である。他にも、リベットを使用して両面の配線の導通させる手法もある [13]。しかし、これらの手法は依然として専用の導電性インクを必要とし、配線印刷が可能な素材が専用の用紙のみに限られている。

他にも、導電性フィラメントと3Dプリンタを使用する手法を応用することで両面基板を作ることも可能である。例えば、通常のフィラメントと導電性フィラメントを組み合わせ、造形物に電子配線を埋め込み、立体的な基板を製作することができる [14], [15]。しかし、導電性フィラメントを使用した3Dプリントは、糸引き等が原因で造形品質が低下してしまう問題が報告されている [16]。

3. 提案手法

我々は、過去にシングルエクストルーダーのFDM方式3Dプリンタと金属転写箔、ボールキャストを用いて表面が平らな素材で片面基板を製作する手法を提案している [4]。これは、3Dプリンタによって加熱させたボールキャストを、印刷したい素材の上に置かれた金属転写箔の上に押し当てることで、様々な素材の平面上に金属箔を転写することができる手法である。この手法を応用して、提案手法ではPLA樹脂を含む様々な素材を基材として両面基板を製作する。

両面基板を製作するにあたり、必要になるのがビア（あるいはスルーホール）である。提案手法では、このビアを以下の手順で作成する。

- (1) 基材上のビアとなる部分に、あらかじめ穴を開けておく。
- (2) 表面を上にして基材を3Dプリンタのビルドプレート上に配置し、表面に金属転写箔を被せて配線を印刷する。



図 4: 実際に使用したボールキャスト。0.5 mm 径のボールペンの先端を使用している。

- (3) 印刷後、金属転写箔を剥がさないまま基材を表裏反転させ、再びビルドプレート上に配置し、金属転写箔を被せる。
- (4) ビアとなる部分に開けておいた穴の中を、(常温の) 棒半田を切って埋めておく。
- (5) 3Dプリンタに取り付けたボールキャストを、半田ごととして使用し、穴に埋めた棒半田を上から熱して溶かす。
- (6) 溶けた半田は、両面に配置された金属転写箔と接合し、両面に印刷される配線が導通する。
- (7) 裏面の配線を印刷する。

今回は、3Dプリンタを使用してPLA樹脂で造形したものを基材として両面基板を製作する。PLA樹脂で造形した基材に配線を印刷できれば、3Dプリンタ1台で基板の製作ができるようになる。しかし、FDM方式の3Dプリンタで造形した物体の表面は滑らかではない。滑らかな平面上を対象とする従来研究 [4] と同様の構成と設定で印刷を行った場合、基材表面の凹凸の凸面にのみ箔が転写してしまう。この問題を、ボールキャストの径や3Dプリンタの設定を変更することで解決する。ボールキャストのボール径を小さくし温度を上げ、さらに送り速度を極端に遅くする。これにより基材の凹凸を溶かして平らにしながら配線を印刷することができるようになる。

4. 実装

4.1 ハードウェア

本手法で使用する3Dプリンタは、CREALITYのEnder3 proである。このプリンタは、シングルエクストルーダーのFDM方式3Dプリンタであり、価格も3万円以内と比較的安価である。さらに、Repetier-Host (フリーソフト) と組み合わせることにより、3Dプリンタとコンピュータをシリアル通信によって接続し、ホストとなるコンピュータから制御用のG-codeを1文ずつ、3Dプリンタに送信して制御することができる。また、この3Dプリンタで使用さ

れているエクストルーダのノズルは、ネジ径 6 ミリのネジでプリンタに取り付けられており、一般に販売されている M6 規格のネジであれば簡単に付け替えることができる。

従来研究 [4] では、一般に販売されている直径 3.18mm ボールキャストを使用していたが、より精密に熱と力を基材に加えるために、新たにボールキャストを製作した。新しいボールキャストでは、ボール径 0.5 mm のボールペンの先端を利用する。ネジ径 6mm の六角ボルトの頭部に金属ドリルで穴を開け、ボールペンの先端を差し込み、耐熱の金属パテで固定した (図 4)。さらに、ノズルの温度を上げ (約 170°C → 約 200°C)、送り速度を極端に遅くすることで、基材の凹凸を溶かして平らにしながら配線を印刷することができる。金属転写箔は、銀ペーストをベースフィルムに付着させた金属転写箔を使用している。

4.2 ソフトウェア

3D プリンタを制御する方法の一つとして、G-code と呼ばれる 3D プリンタ制御用のコードがある。従来研究 [4] では、3DCAD ソフトで生成した印刷パターンをもとに、スライサソフトで自動的に G-code を生成し、その G-code を編集*2してからコードをバイナリ形式に変換し、印刷を行っていた。この手法にはいくつかの欠点がある。

まず、基材の位置合わせの難しさである。配線の印刷開始位置や印刷の順番は、スライサソフトのコード生成アルゴリズムに依存しており、印刷の開始位置やオフセットが不明で、基材を適切に配置することが困難であった。さらに、印刷パターンを変更するたびに印刷位置や順番が変わってしまう。そのため、基材の位置合わせを比較的容易にする方法を検討する必要があった。

また、スライサソフトにより生成されるコードには不要な部分や、編集・追加が必要な部分が数多くある。例えば、ピアを形成するために低融点半田を上から熱して溶かすための G-code は、スライサソフトでは生成できない。また、印刷途中のボールキャストの温度を途中で変更する G-code を追加する必要もある。

本研究では、csv ファイル形式を使用した配線データをもとに、配線印刷用 G-code を生成する。csv ファイルには、配線の起点となる座標 (X, Y 座標) と終点となる座標の組み合わせ、もしくはピアホールを作る場所の座標を、ユーザ自身が基材の設計を基に書き込む。そして、自作の Java プログラムが、csv ファイルに書き込まれた情報を順に読み取り、G-code への変換を行った後、3D プリンタに送信する。

5. 製作実験

PLA 樹脂で造形した基材に対してピアを作る製作実験

*2 非転写部分を移動する時の Z 軸の調整と、樹脂を押し出すモーター動作の無効化

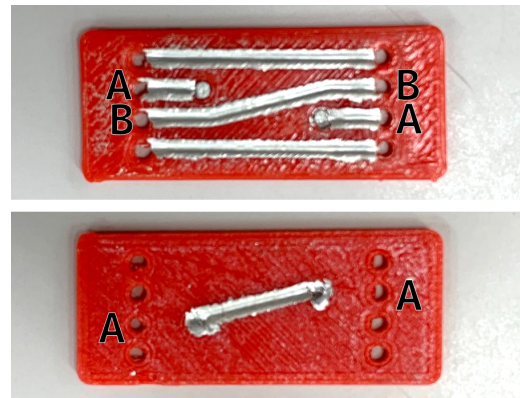


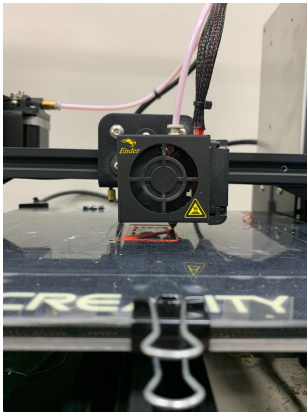
図 5: PLA 樹脂で造形した基材に印刷した基板。点 A, B 同士は導通する。

を行った。3DCAD ソフトで、30 × 50 × 1mm の直方体に、直径 1.6 mm の穴を計 8 つ配置したモデル (基材) を製作した。両面配線印刷の手順は以下の通りである。

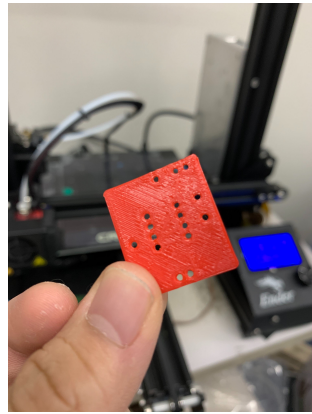
- (1) 製作したモデルを 3D プリンタで印刷する (図 6a, 6b)。
- (2) 印刷された基材を剥がした後、ビルドプレート上に再び配置し、銀ペーストの金属転写箔を基材の上に覆うようにして置き固定する。
- (3) エクストルーダのノズルを通常のノズルからボールキャストに付け替える。(図 6c)
- (4) ボールキャストを熱し、熱したボールキャストが基材上の配線を印刷したい部分に押し当たるように動かす (図 6d)。この時のエクストルーダの設定温度は 200 °C、ビルドプレートの設定温度は 60 °C、ボールキャストの送り速度は 25mm/分である。
- (5) 片面の印刷後、基材を裏返し、再び物体をビルドプレートの上に配置する。
- (6) ピアを作りたい部分の穴を、低融点半田で埋める。(図 7a)
- (7) 穴を半田で埋めた基材の上に再び転写箔を配置する。
- (8) 転写箔の上から半田に熱を加えて溶かし、半田を両面の配線と導通させた後、4 と同様に配線を印刷する。
- (9) 印刷後、金属転写箔を基材から剥がし、余分な金属箔をブラシで擦り取る。

製作したテスト基板を図 5 に示す。

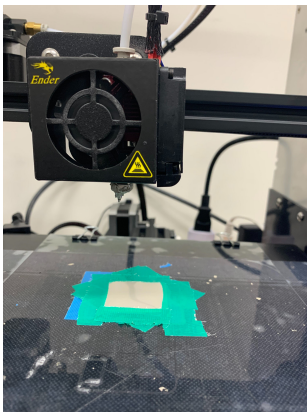
この基板は 2 つのピアを持つ。左右に 4 つずつある穴のうち、中の 2 本の配線の位置関係が入れ替わっている基板である。A 同士は、途中でピアを経由しており、B 同士とその他の配線はピアを経由していない。抵抗値を調べたところ、図 5 の、点 A 同士間の抵抗値は約 0.9Ω、点 B 同士間は約 0.6Ω、それ以外は約 0.6Ω であった。これより、ピアが正しく機能していることが分かった。



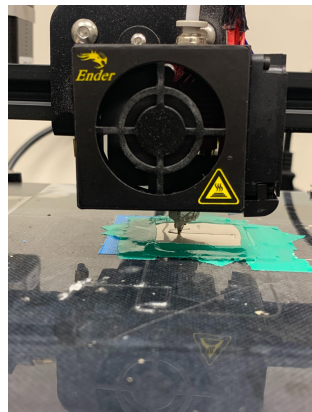
(a) PLA樹脂で基材を造形している様子。



(b) 造形した基材。

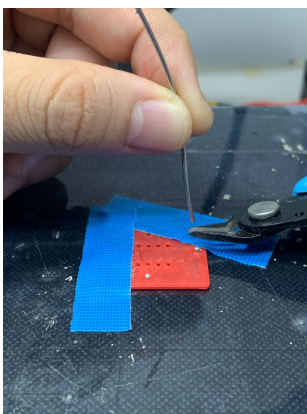


(c) 印刷直前の様子。基材はビルドプレート上に固定され、エクストルーダのノズルも付け替えている。



(d) 配線印刷の様子。

図 6: PLA樹脂を基材にした両面基板製作の手順 1.



(a) ビアとなる部分に棒半田を埋めている様子。



(b) 低融点半田を使用しているため、PLA樹脂で造形した基材に対しても半田付けが行える。

図 7: PLA樹脂を基材にした両面基板製作の手順 2.

5.1 アプリケーション例

さらに、PLA基板にLEDや抵抗、マイクロコントロー

ラなどを実装した電子回路を製作した(図1)。これは、基板中央にマイクロコントローラ(PIC12F683)を配置し、1秒おきに左右のLEDが交互に点灯する電子回路である。基板右側は砲弾型LEDとアキシャル抵抗で実装し、左側は表面実装タイプの電子部品で実装した。いずれの電子部品も、接着剤で基板に固定した後、低融点半田を使用して手動で実装している(図7b)。このように、どちらのタイプの電子部品でもはんだ付けによる実装が可能であり、正しく動作することが確認できた。さらにPLA基板の他に、4つの素材を用いて基板を製作し、電子部品の実装を行った(図8)。アクリル板、マット紙、ベニヤ板、MDFを、レーザーカッターを使用して基材の形になるようにカットし、提案手法で配線を印刷した後に低融点半田を使用して手動で実装したものである。これらの回路は正しく動作している。使用した素材の厚さはどれも1mmである。配線の印刷には、ボール径3.18mmのボールキャストを使用した。これは、基材の表面がすでに平滑であるため、強い力を加えながらボールキャストを熱し基材を溶かす必要が無いからである。このように、基材の材質により使用するボールキャストを変更することで、基材の特性に合わせて配線を印刷することができる。

6. 考察

製作実験の結果から、アクリル板や木材、マット紙など様々な素材を基材として基板を製作し、いずれも正しく動作することがわかった。今回製作実験に使用した素材は全て固い素材であり、ガラスエポキシなどの通常のPCBの代用として使用することができる。しかし、適用範囲を固い素材に限定する必要はない。例えば、布やゴムなどの比較的柔らかい素材でも両面基板が製作できれば、さらにデザインの自由度を増やすことができるだろう(例えば、衣類の表面にLEDを実装することが容易になる)。今後、柔らかい素材に対しても、提案手法を適用できるかどうか確認していく必要がある。

6.1 課題

製作を行っている途中で様々な問題点を発見した。先述の通り、使用した半田は、部品取り外し用の低融点半田(融点60~70°C)であるため、電子部品を固定し、実装するために使用するものではない。そのため、実装後の電子部品に少しでも衝撃を加えると簡単に半田が外れてしまう。しかし、通常の半田(融点200°C前後)を使用すると、基材が溶けて変形し、さらには基材に印刷した銀ペーストが破損してしまう問題点がある。この耐久性の問題は、実装する電子パーツに接着剤を塗り、あらかじめ基材に接着してから低融点半田による半田付けを行うことで対処したが、接着の工程が増えている。使用する半田の種類や配線の素材を変えることで、接着剤が不要になる方法を検討し

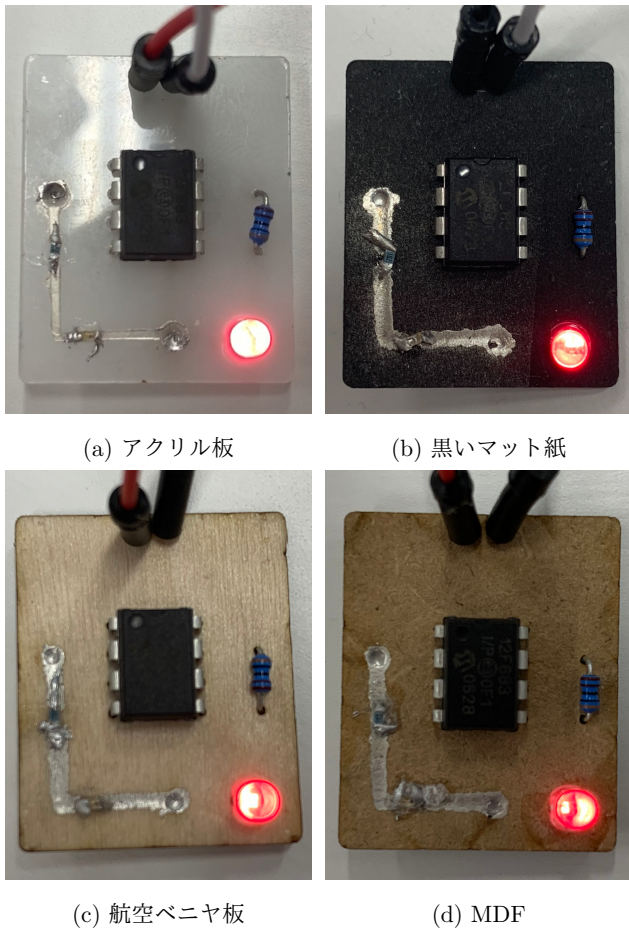


図 8: 両面基板の電子回路の例。4つの電子回路の構成は同じであるが、基材の材質が異なる。基材の厚さはいずれも 1.0mm である。

ていく。

もう一つの問題は、印刷時の位置合わせの煩雑さである。配線の印刷時に、基材の位置が少しでも印刷位置からずれていると、すべての配線がずれて印刷される。位置合わせを比較的容易に行うために、印刷開始位置と、印刷される基材の任意のビアもしくはスルーホールを合わせる手法を採用しているが、この手法にも問題点がある。印刷開始位置の座標が分かっているとしても、その座標が現実世界でどこを指しているのかが分かりづらい。この問題は、ビルドプレート上に罫線を描き、特定の位置の座標をビルドプレートにマークおくことで解消できると考える。

7. 結論

FDM方式の3Dプリンタと金属転写箔、ボールキャストを用いた両面基板製作手法を提案し、PLA樹脂で造形した基材の両面に電子配線を印刷して、両面基板が製作できることを確認した。また、PLA樹脂に限らず、様々な素材で作られた基板上で電子部品を実装し、動かすことができるアプリケーション例を示した。この手法を用いることで、シングルエクストルーダのFDM方式3Dプリンタ、

金属転写箔、ボールキャストと基材となる素材が揃えば、両面基板の製作が可能である。

参考文献

- [1] Gershenfeld, N.: *Fab: the coming revolution on your desktop-from personal computers to personal fabrication*, Basic Books (2008).
- [2] Stemp-Morlock, G.: Personal Fabrication, *Commun. ACM*, Vol. 53, No. 10, p. 14-15 (online), DOI: 10.1145/1831407.1831414 (2010).
- [3] Mota, C.: The Rise of Personal Fabrication, *Proceedings of the 8th ACM Conference on Creativity and Cognition, C&C '11*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 279-288 (online), DOI: 10.1145/2069618.2069665 (2011).
- [4] Imai, Y., Kato, K., Segawa, N. and Manabe, H.: Hot Stamping of Electric Circuits by 3D Printer, *The Adjunct Publication of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '19*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 128-130 (online), DOI: 10.1145/3332167.3356895 (2019).
- [5] 後閑哲也: だれでも手軽にできる 電子工作入門, 技術評論社 (2001).
- [6] Kawahara, Y., Hodges, S., Cook, B. S., Zhang, C. and Abowd, G. D.: Instant Inkjet Circuits: Lab-Based Inkjet Printing to Support Rapid Prototyping of UbiComp Devices, *Proceedings of the 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, UbiComp '13*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 363-372 (online), DOI: 10.1145/2493432.2493486 (2013).
- [7] Groeger, D. and Steimle, J.: ObjectSkin: Augmenting Everyday Objects with Hydroprinted Touch Sensors and Displays, *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 1, No. 4, pp. 134:1-134:23 (online), DOI: 10.1145/3161165 (2018).
- [8] Espalin, D., Muse, D. W., MacDonald, E. and Wicker, R. B.: 3D Printing multifunctionality: structures with electronics, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 72, No. 5, pp. 963-978 (online), DOI: 10.1007/s00170-014-5717-7 (2014).
- [9] Kao, H.-L. C., Holz, C., Roseway, A., Calvo, A. and Schmandt, C.: DuoSkin: Rapidly Prototyping On-skin User Interfaces Using Skin-friendly Materials, *Proceedings of the 2016 ACM International Symposium on Wearable Computers, ISWC '16*, New York, NY, USA, ACM, pp. 16-23 (online), DOI: 10.1145/2971763.2971777 (2016).
- [10] Tobjörk, D. and Österbacka, R.: Paper Electronics, *Advanced Materials*, Vol. 23, No. 17, pp. 1935-1961 (online), DOI: 10.1002/adma.201004692 (2011).
- [11] Segawa, N., Kato, K. and Manabe, H.: Rapid Prototyping of Paper Electronics Using a Metal Leaf and Laser Printer, *The Adjunct Publication of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '19*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 99-101 (online), DOI: 10.1145/3332167.3356885 (2019).
- [12] Ta, T., Fukumoto, M., Narumi, K., Shino, S., Kawahara, Y. and Asami, T.: Interconnection and Double Layer for Flexible Electronic Circuit with Instant Inkjet Circuits, *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Com-*

- puting, UbiComp ' 15, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 181–190 (online), DOI: 10.1145/2750858.2804276 (2015).
- [13] Andersson, H. A., Manuilskiy, A., Haller, S., Hummelgård, M., Sidén, J., Hummelgård, C., Olin, H. and Nilsson, H.-E.: Assembling surface mounted components on ink-jet printed double sided paper circuit board, *Nanotechnology*, Vol. 25, No. 9, p. 094002 (online), DOI: 10.1088/0957-4484/25/9/094002 (2014).
- [14] Burstyn, J., Fellion, N., Strohmeier, P. and Vertegaal, R.: PrintPut: Resistive and Capacitive Input Widgets for Interactive 3D Prints, *Human-Computer Interaction – INTERACT 2015* (Abascal, J., Barbosa, S., Fetter, M., Gross, T., Palanque, P. and Winckler, M., eds.), Cham, Springer International Publishing, pp. 332–339 (2015).
- [15] Kato, K. and Miyashita, H.: 3D Printed Physical Interfaces That Can Extend Touch Devices, *Adjunct Proc. UIST '16*, pp. 47–49 (online), DOI: 10.1145/2984751.2985700 (2016).
- [16] Hergel, J. and Lefebvre, S.: Clean color: Improving multi-filament 3D prints, *Computer Graphics Forum*, Vol. 33, No. 2, pp. 469–478 (online), DOI: 10.1111/cgf.12318 (2014).