Vol.2020-HCI-190 No.2
Vol.2020-UBI-68 No.2
2020/12/8

3D プリンタと転写箔を用いた片面実装多層基板の製作手法

今井 悠平[1,a)]　真鍋 宏幸[1,b)]

概要：電子配線の立体交差が可能になれば，複雑な電子回路の構築が可能になる．配線の立体交差の実現方法として，両面基板がある．しかし両面基板には複雑な工程によるビアの構築が必要不可欠となるため，個人での基板製作は困難であった．本稿では，我々が提案した 3D プリンタと金属転写箔を使用した電子配線印刷手法を発展させ, 配線の立体交差が可能な片面電子基板を製作する手法を提案する．提案手法では，紙やアクリル板などの素材を基材とし，薄い絶縁テープと組み合わせることで片面実装多層基板を製作する．ビアが不要になるため，個人での電子回路製作が容易になると期待できる．製作実験として，4 層の片面実装多層基板を製作した．さらに，製作した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

3D プリンタやレーザーカッターなどのモノづくりのための機材の家庭への導入が進み，今後はパーソナルファブリケーションがより推進されるとだろう．将来的には，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 プリンタを用いれば，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．

家庭で簡単に電子配線を作成する手法として，我々は 3D プリンタと金属転写箔を使用した片面基板の製作手法 [1] や，両面基板の製作手法 [2] を提案してきた．この手法では，様々な素材を基材として，片面基板や両面基板を製作することができる．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．しかし，ビアの製作が煩雑である問題，表面と裏面の配線の印刷位置の大きなずれが許されていない問題など，多くの問題が依然として残っている．さらに，我々の従来の研究では，最大でも 2 層の配線を印刷することができず，より複雑な配線をより複雑な配線を印刷することが難しかった．本稿では，そのような表面と裏面との導通や位置合わせを必要とせずに多層の回路を印刷できる手法を提案する．これにより，配線の印刷に失敗するリスクを大きく減らすことができ，個人での製作がより容易になる．また，3 層以上の配線の印刷が可能になるため，より複雑な回路を構築することができる．さらに提案手法は様々な素材に対し切り出したり穴を開けたりせずに実装できるため，デザインを損なわずに組み込むことができる．

1 芝浦工業大学
a) ma20009@shibaura-it.ac.jp
b) manabehiroyuki@acm.org

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．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 [3].

(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) ぬ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，間をあけ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．
(5) エッチング処理が終わった基板をアルコールで拭き，感光剤を除去する．
(6) ドリルを使い，基板に穴を開ける．
(7) 基板の表面にフラックスを塗布して仕上げる．

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．

さらに，表裏の配線を接続するスルーホールやビアの作

ⓒ 2020 Information Processing Society of Japan

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．

また両面基板は，先述の手順を両面で行いつつ，表裏の配線パターンの位置を正確合わせなければならない．

また，プリント基板加工機を用いて銅板から切削して配線を構築する方法もあるが，そのような機器はとても高価であるため，個人が家庭に導入するのは難しい．

また，プリント基板を外部に発注する方法もあるがいくつか課題がある．まず外部発注による製作は，発注から手元に届くまでに時間がかかり，試行錯誤を繰り返しながら製作する個人での開発では作業効率が下がってしまう．また，外部発注による基板製作は同じ基板をロットで複数枚発注しなければならない場合が多い．個人での製作は多くの場合，基板製作は 1 枚でよいため，外部への発注はコストがかかる．

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した手法が Kawahara らより提案されている [4]．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 [5]．

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 [6]．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る．

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 [7], [8], [9]．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，風に当てたりす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．

*1 例えば，VOLTERA の V-One.

2.3 多層基板製作に関する研究

kawahara による片面基板製作の手法 [10] を発展させて，両面基板のラピットプロトタイピング手法が提案されている．専用紙上のビアを作りたい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 [11]．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多層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 [12], [13]．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 [14]．また，3D プリンタで造形した物体を基材として，銅箔テープを用いて両面基板を製作する手法が提案されている [15]．

2.4 我々の従来研究

我々は過去に，FDM 方式の 3D プリンタと，金属転写箔，ボールキャスタを用いた電子配線の印刷手法 [1] を提案している．金属転写箔は，先述の手法 [7], [8], [9] で使用されている一般的な金属箔とは異なり，フィルムでコーティングされている．この手法では，金属転写箔を用いてロゴなどを印刷するホットスタンプと呼ばれる技術と，3D プリンタを組み合わせて，様々な素材に対して電子配線を印刷する．この手法を応用し，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手法を提案している [2]．しかし，両面基板の製作にはビアの製作が必要不可欠である．一般的に，ビアの製作は基材に対しての穴開け，表面と裏面の配線の位置合わせ，表裏の配線同士の導通などの作業が必要である．従来研究 [2] でもこれらの作業が必要であり，基板製作における作業の大部分を占めていた．また，配線印刷時に，印刷のずれが両面で数 mm しか許されず，製作に失敗するリスクがかなり大きかった．

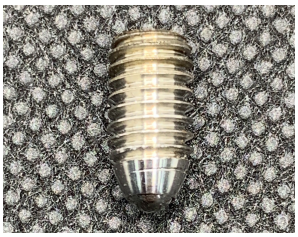
3. 提案手法

提案手法では我々の従来研究を踏まえ，様々な素材を基材として，素材の片面に多層基板を製作する．薄い絶縁膜としてカプトンテープを用いることで，配線の交差を可能にする．これにより，ビアの製作が不要になるため，個人での製作も容易であると考える．また，片面で実装が可能であるため，大きなオブジェクトの表面にも多層基板の実装をすることができる．さらに，従来研究 [1], [2] では最大で 2 層の配線の印刷が可能であったが，今回の手法ではさらに多くの層の配線を印刷することができる．

4. 実装

4.1 ハードウェア

図 1: 使用した FDM 方式 3D プリンタ．Ender3-pro．2020 年 11 月現在，3 万円以内で購入可能である．



(a) ミスミ製ボールキャスタ．先端ボール径は 3.18 mm.

(b) 製作したボールキャスタ．先端ボール径は 0.5 mm.

図 2: 製作に使用したボールキャスタ．

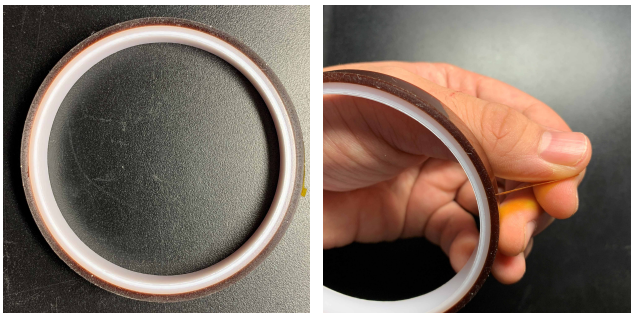


図 3: 使用したカプトンテープ．寺岡製作所 650S#12．幅 10 mm，厚さ 0.012 mm のカプトンフィルムにシリコーン系接着剤を塗布したものである．総厚は 0.035 mm で，約 200 ℃までの加熱に耐えられる．

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．

ボールキャスタは，従来研究 [1], [2] で使用した 2 種類（市場で販売されている直径 3.18 mm ボールキャスタ（図 2a），0.5 mm 径のボールペンのペン先を使用したボールキャスタ（図 2b））を使用する．ボールペンのペン先を使用したボールキャスタは，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ものである．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．

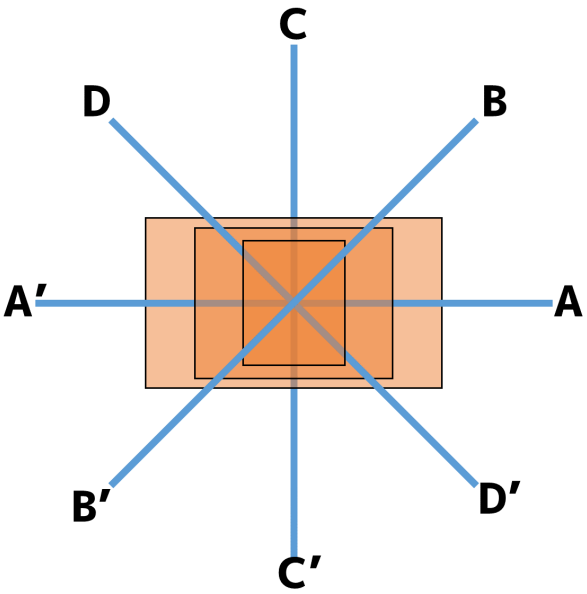
4.2 ソフトウェア

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を，ユーザ自身が基材の設計を基に書き込む．そして，製作した Java プログラムによって，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 プリンタ制御ソフトで 3D プリンタに送信する．

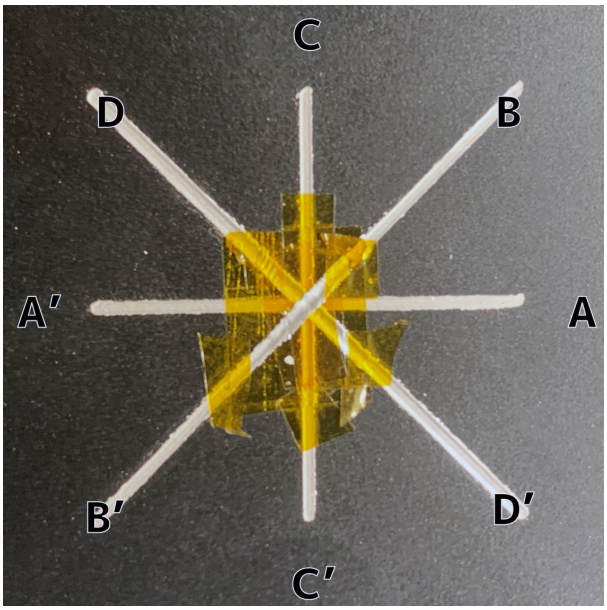
5. 製作実験

提案手法による配線の印刷が可能か確認するため，実験を行った．黒色のアクリル板に対して，4 層の配線の印刷を行った．使用したボールキャスタは，ミスミ製のボール径 3.18 mm のもの（図 2a）である．金属転写箔は，銀ペーストのものを使用した．縦横方向に 30 mm，斜め方向に約 42 mm の計 4 本の配線を同じ場所でクロスさせる配線である（図 4a）．配線印刷の手順は以下の通りである．

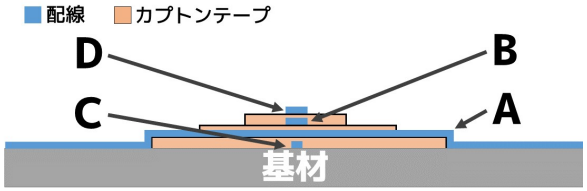
(1) 基材となる素材を，3D プリンタのビルドプレート上に配置し固定し，銀ペーストの金属転写箔を基材の上に覆うようにして置き固定する．
(2) ボールキャスタを熱し，熱したボールキャスタが基材上の最下層の配線を印刷したい部分に押し当たるように動かす．この時のエクストルーダーの設定温度は 200 ℃，ビルドプレートの設定温度は 60 ℃，ボールキャスタの送り速度は 50mm/分である．
(3) 配線の印刷後, 金属転写箔を剥がし，基材はビルドプレート上に固定したまま，基材に付着した余分な箔を取り除く．
(4) 配線が交差する部分にカプトンテープを貼り付け，再



(a) 製作実験で製作した配線の概略図．点 A と A’，B と B’，C と C’，D と D’ 間は導通する．他の点間では導通しない



(b) 製作実験で製作した配線．表面がマットな黒色アクリル板に印刷している．配線は C,A,D,B の順番で印刷されている．また，アクリル板とカプトンテープとの段差の部分は断線しやすいため，配線の印刷後にカプトンテープを上から貼り付けることで補強している．



(c) 製作実験で製作した基板を配線 A に沿って中央で切断した断面図の概略．

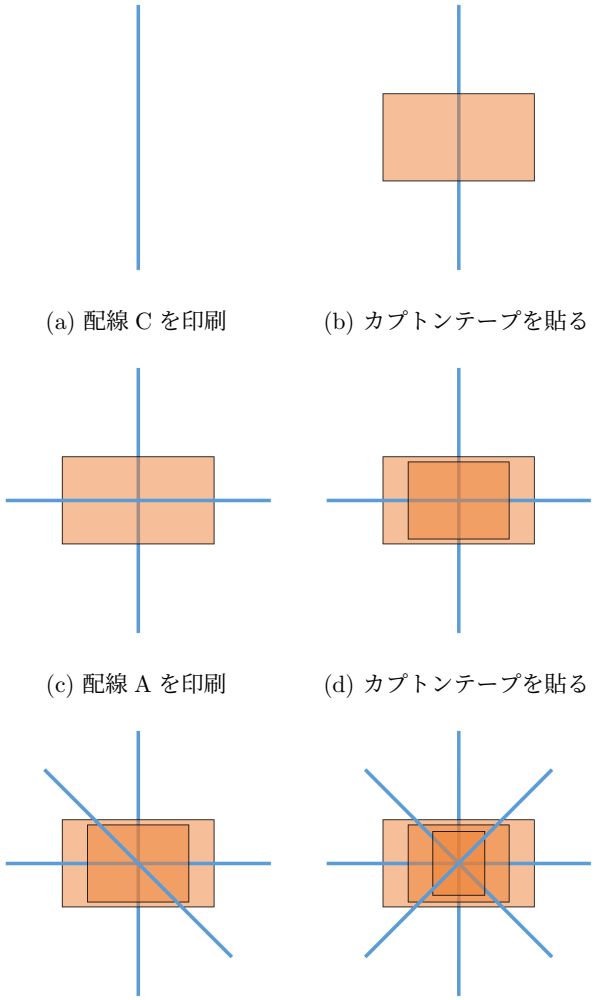
図 4: 製作実験の概略図と製作実験結果．

び金属転写箔を覆うように置き固定する．

(5) 2 と同様に配線を印刷する．

(6) 3 と 4 を，すべての層の配線の印刷が終わるまで繰り返す．

製作の順序を図 5 に示す．



(a) 配線 C を印刷　(b) カプトンテープを貼る

(c) 配線 A を印刷　(d) カプトンテープを貼る

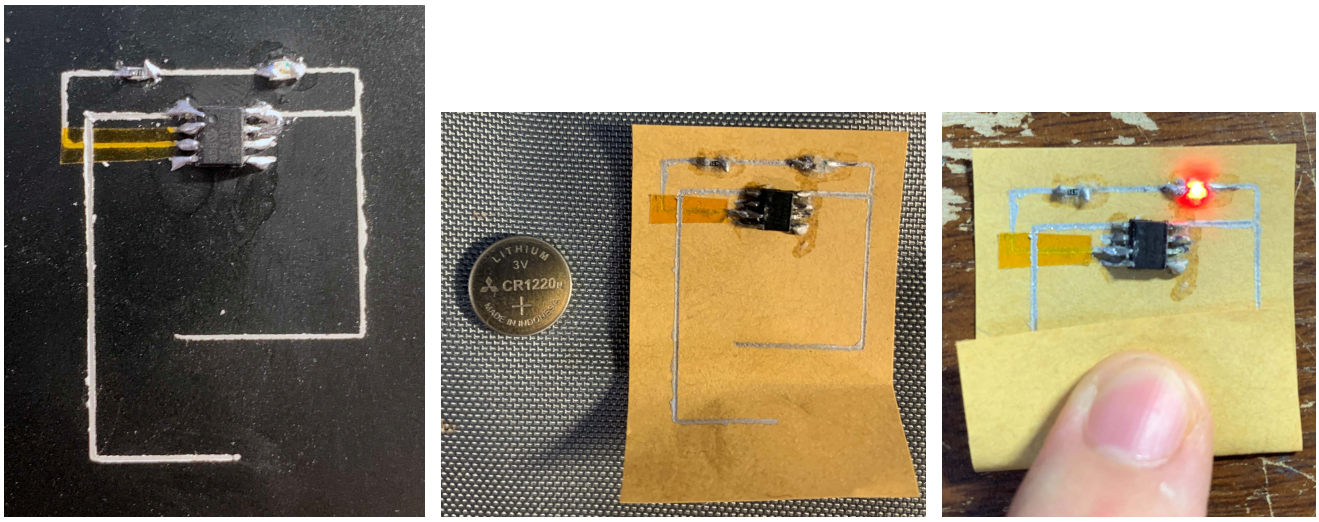
(e) 配線 D を印刷　(f) カプトンテープを貼り，配線 B を印刷．

図 5: 製作実験の印刷の順序．

製作したテスト基板を図 4b に示す．この基板は 4 本の配線は同じ場所で交差しているが，4 本の配線はそれぞれ独立しており，他の配線と導通しない．基板の断面図を図 4c に示す．抵抗値を調べたところ, 図 4b の, それぞれの配線の抵抗値は点 A,A’ 間が約 1.5Ω，点 B,B’ 間が約 B2.0Ω，点 C,C’ 間が約 1.5Ω，点 D,D’ 間が約 1.0Ω であった．これより，4 本の配線が正しく印刷されていることが分かった．よって，提案手法を用いれば，ビアを作らずとも 3 層以上の片面実装多層基板を製作できることが示された．

5.1 アプリケーション例

提案手法によって印刷された配線が，正しく動作するか



(a) (b) (c)

図 6: 製作したアプリケーション例．同じ配線を，アクリル板上と紙面上に印刷し，電子部品を実装した．(a) アプリケーション例 1．アクリル板に対して配線を印刷し，表面実装部品をはんだ付けで実装している．(b) アプリケーション例 2．紙に対して配線を印刷し，表面実装部品をはんだ付けで実装している．(c) アプリケーション例 2 は，ボタン電池を挟み込むように紙を折り曲げると回路が完成し，LED が点滅する．

確認するためのアプリケーション例を提示する．アクリル板を基材として配線を印刷し，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 6a）．これは，基板中央にマイクロコントローラー（PIC12F683）を配置し，1 秒おきに LED が点滅する電子回路である．電子部品の実装には細い配線が必要であるため，配線の印刷にボール径 0.5 mm のボールキャスタ（図 2b）を使用した．

LED と抵抗は，どちらも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実装している．

このように，低融点半田による半田付けで電子部品の実装が可能であり， 正しく動作することが確認できた．

さらにアクリル板の他に，普通紙を基材として基板を製作し，電子部品の実装を行った (図 6b)．

アクリル板と紙に実装した回路はどちらも正しく動作している（図 6c)．

6. 考察

製作実験の結果から，アクリル，紙などの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．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)．従来研究では両面の 2 層基板の製作が限界であったが，提案手法では製作実験から 4 層の配線の印刷が可能であることを確認しており，提案手法による多層配線基板の製作は可能であることが分かった．さらに，製作の過程で穴あけや位置合わせなどを行わないため，個人での製作がより容易になったと考える．また，配線印刷中の失敗のリスクがかなり小さくなると考える．また，ビア製作が必要なく，従来手法が適用できなかった素材に対しても適用できると考えられる．例えば角材は，表面と裏面との間に距離があり，ビアを作ることが困難であった．提案手法では，片面のみで多層配線の印刷が可能であるため，これらの問題は起きない．

製作実験を通して，配線の印刷向きに気を付けなければならないことが分かった．絶縁膜として使用しているカプトンテープがあまりにも薄いため，上から強い力を加えながら段差の下から上に向かって動かすと，カプトンテープを引っ掻き，剥がしてしまう．段差に配線を印刷する時は，必ず段差の上から下に向かって印刷しなければならないことが分かった．製作実験で製作した配線 (図 4b)A,B,D はその対象であり，印刷は段差の一番高い部分 (今回の場合は配線が交差する中央部分) から 2 回に分けて印刷している．

6.1 課題

提案手法により多層基板製作においてビアの製作が不要になり，従来研究 [2] の課題であった印刷時の位置合わせの煩雑さを解消することができた．しかし，依然として低融点半田による半田付けは耐久性がなく，電子部品の接着には向いていない問題が解消できていない．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ているが，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ていく．

ⓒ 2020 Information Processing Society of Japan

他の課題は，製作実験に使用した素材の種類が少ないことである．今回使用したアクリル板は，黒色で表面がマットなものであったが，透明なものや表面が光沢であるものなどでは実験しておらず，提案手法がアクリル板に対して適用できると断言できるわけではない．また，従来研究では適用できなかった素材が提案手法で適用できることを主張するためには，他の素材（例えば布や角材）でも製作実験を行う必要がある．

また配線耐久性について課題がある．図 6a の場合では，配線の印刷にボール径 0.5 mm のボールキャスタ（図 2b）を使用ているが，アクリル板とカプトンテープとの段差で断線してしまい，印刷に失敗してしまうことがある．図 6b のような紙面に印刷する場合ではそのような事象は確認されなかった．また，図 4b の配線は，ボール径 3.18 mm のボールキャスタ（図 2a）を使用ているが，段差部分での完全な断線は確認されなかった．しかし，部分的な断線は確認しているため，印刷終了後に段差部分をテープで補強している．このことから，ボールキャスタと基材となる素材との適切な組み合わせについて検討していく必要がある．

7. 結論

FDM 方式の 3D プリンタと金属転写箔，ボールキャスタ，カプトンテープを用いた片面実装多層基板の製作手法を提案した．提案手法は，表面と裏面との導通や位置合わせを必要とせずに多層の回路を印刷でき，従来研究の課題であった穴あけや，位置合わせや穴あけの煩雑さを解消でるため，個人で容易に多層基板を製作できる．

他の素材への適用可能性や，印刷した配線の耐久性について検討する必要がある．

謝辞 本研究は JSPS 科研費 20K19851 の助成を受けたものです．

参考文献

[1] 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*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 128–130 (online), DOI: 10.1145/3332167.3356895 (2019).

[2] 今井悠平，加藤邦拓，瀬川典久，真鍋宏幸：3D プリンタと転写箔を用いた両面基板の製作手法，研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI)， Vol. 2020, No. 13, pp. 1–7 (2020).

[3] 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).

[4] 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*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 363–372 (online), DOI: 10.1145/2493432.2493486 (2013).

[5] 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).

[6] 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).

[7] 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).

[8] Tobjörk, D. and Österbacka, R.: Paper Electronics, *Advanced Materials*, Vol. 23, No. 17, pp. 1935–1961 (online), DOI: 10.1002/adma.201004692 (2011).

[9] 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*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 99–101 (online), DOI: 10.1145/3332167.3356885 (2019).

[10] 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 Computing*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 181–190 (online), DOI: 10.1145/2750858.2804276 (2015).

[11] 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).

[12] 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).

[13] 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).

[14] 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).

[15] Umetani, N. and Schmidt, R.: SurfCuit: Surface-Mounted Circuits on 3D Prints, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 37, No. 3, pp. 52–60 (online), DOI: 10.1109/MCG.2017.40 (2017).

ⓒ 2020 Information Processing Society of Japan