

CircWood: CW レーザー加工機による炭化を利用した木製回路基板

石井 綾郁* 加藤 邦拓† 池松 香‡ 川原 圭博§ 椎尾 一郎*

概要. 本研究では、レーザー加工機で木材表面を部分的に炭化させ、木材に直接センサや回路を作成する手法を提案する。一般的なプリント基板 (PCB) の配線と同様、炭化部分は導電性を有する配線として機能する。先行研究として、フェムト秒 (fs) レーザーをラスタスキャンし小規模なグラフィックを作成する手法が提案されているが、fs レーザーは連続波 (CW) レーザーと比較するとパーソナルファブリケーションに不向きである。また、ラスタスキャンでは配線が主体の回路を作成する場合多くの時間を要する。そこで我々は、CW レーザーによるベクタスキャンを利用し、炭による回路の作成に必要なコストと時間を低減する。提案手法では、パーソナルファブリケーションで頻繁に使用される CW レーザー加工機を用いて、タッチセンサ、ダメージセンサ、荷重センサなどのさまざまなセンサや回路を木材表面に直接作成することができる。さらに、作成したセンサや回路は木工 DIY で一般的に使用される金属製のネジや釘を使用し PCB やマイコンなどに容易に接続できる。

1 はじめに

木は有機的な構造を持ち熱伝導率が低く、独特の温もりを有するため、家具や壁掛けボードなどの日常的に触れるようなさまざまな製品の材料として使用されてきた。木材を加工する伝統的な各種工具に加えて、最近ではレーザー加工機による加工が普及しつつある。レーザー加工機ではレーザー光を利用して木材を加工するが、切断と彫刻以外の加工方法は広く探求されてこなかった。我々は、連続波 (CW) レーザー加工機で木材を部分的に炭化させ、木材表面に直接さまざまなセンサや回路を作成する手法を提案する。一般的なプリント基板 (PCB) と同様に、炭化した部分は導電性のある配線として機能する。

ラスタスキャン方式 (主に彫刻に用いられる方式) のフェムト秒 (fs) レーザーを用いて木や葉の表面にグラフィックを生成し、これを使用した回路を作成する手法が提案されている [11]。fs レーザー加工機は CW レーザー加工機に比べて高価であり、パーソナルファブリケーション (以下、ファブリケーション) に不向きである。また、ラスタスキャンでは、配線を主体とした回路パターンの作成に多大な時間を要する。本論文では、CW レーザーによるベクタスキャン (主に切断に用いられる) を利用することで先行研究の手法を拡張する。導電性を有する炭を十分に生成させるため、レーザーの焦点をぼかし、繰り返し (8~15 回) ベクタスキャンを行う。本手法により、炭による回路の作成時間を先行研究の手法と比べて 1/600 に短縮することができる。また、回路以外にも、タッチセンサ、ダメージセン

サ、荷重センサなどのさまざまなセンサを実装した。これらのセンサや回路は、一般的な PCB やマイコンなどに、木工 DIY で使用される金属のネジや釘を使って容易に接続することができる。本手法は木に導電性塗料などの人工物を適用することなく、木そのものから生成する物質を利用しセンサや配線パターンを作成する。よって、素材を活かしたインタフェースによる自然なインタラクションが可能である。なお、本研究の一部について ACM UIST2021 でデモ発表を行った [6]。

2 関連研究

2.1 回路のファブリケーション

回路やセンサのファブリケーションのために、さまざまな手法が提案されている。その一つに、導電性インクを用いインクジェットプリンタで導電回路パターンを印刷する手法がある。Kawahara らは、銀ナノ粒子インクを装填したインクジェットプリンタを使用し、紙に電子回路を印刷するラピッドプロトタイピング技術を提案した [8]。低コストなプロトタイピングが可能のため、その後の多くの研究でこの手法を利用したセンサ [3, 12, 7, 22, 14], NFC アンテナ [16], 積層回路 [21], ディスプレイ [15] などが作成されている。この手法では焼結などの後処理を行わないため、印刷された回路は耐久性が低いとされている [14]。そこで、印刷面を高温で硬化させることで、伸縮可能な材料の上に堅牢な回路を作成する Soft Inkjet Circuits が提案された [9]。

プリンタの印刷可能領域を超える大きな平面へ回路を実装するために、導電性塗料やスプレーを利用する技術がいくつか提案されている。FlexTouch [24], Electrck [27], Sprayable User Interfaces [25] は、導電性塗料を壁や家具に塗ったり吹き付けたりするこ

* お茶の水女子大学

† 東京工科大学

‡ ヤフー株式会社

§ 東京大学

とで、静電容量方式によるタッチ入力を可能にする。

また、抵抗値が低く、容易に切断、折り曲げが可能で低コストである銅テープや銅箔を使用する手法も提案されている。Midasは、銅テープをカッティングプロッタでカットし、静電容量式のタッチセンサや配線を作成するツールである [18]。Perumalらは、汎用のインクジェットプリンタやレーザープリンタと汎用のインクを使用した PCB の作成を実現する Printem フィルムを開発した [1]。これらの手法には、切断後に不要な材料を除去するのが面倒で時間がかかること、除去する際に細い配線が断線する可能性があることなど、いくつかの欠点がある [18]。上記以外にも、金箔 [20, 17]、水圧転写技術 [4]、導電性材料を塗布したナイロン繊維 [10]、カーボンコート紙 [28] などが回路の作成に用いられている。

以上のように、実験室環境での迅速で低コストな回路のファブリケーション手法が多数提案されている。一方、本研究では、レーザー加工によって木材表面に炭を生成し、これを用いて回路やセンサを作成する。炭による回路配線の抵抗値は既存手法での配線の抵抗値よりも高いが、我々の手法では木そのものから生成する物質を利用しセンサや配線パターンを作成できる。従来手法で木材表面に回路を作成するには、木材に導電性材料を印刷/塗布する必要があり、木の自然な風合いが損なわれてしまう。

2.2 レーザー加工によるファブリケーション

レーザー加工による 3D オブジェクトのファブリケーション手法が盛んに研究されている。例えば、2D の板材に熱を加えて折り曲げる [13]、または溶接して積層する [23] などとして、3次元のオブジェクトをラピッドプロトタイプングする手法がある。これらの手法では、我々と同様、レーザーの焦点を意図的にぼかしてベクタスキャンすることで、素材を傷つけず特定の領域を加熱し、折り曲げと溶接を実現している。レーザー加工機を利用して電子回路を作成する技術も提案されている。LASEC [5] では、一般的なレーザー加工機で透明な導電シートを切断し、伸縮性を持つ回路を作成している。一方我々は、導電材料を新たに塗布することなく、木材表面に炭による回路を作成する。

レーザーを用いて材料の表面を炭化し、小規模 (最大 $3 \times 3 \text{ cm}^2$) のグラフェンを作成する手法がいくつか提案されている [26, 2, 11]。最初期の研究 [26] では、不活性ガスを使用して材料の燃焼を防ぐことで、木材表面にグラフェンを作成する手法が提案されている。その後、CW レーザーの焦点をぼかして複数回照射する手法 [2] と fs レーザーを 1 回照射する手法 [11] が提案され、不活性ガス不使用でグラフェンを作成可能になった。我々の手法では、木の表面に電子回路やセンサを作成することを目的とし、ファブリケーションへの適用を目指している。また、先行研究 [26, 2, 11] では、ラスタスキャン

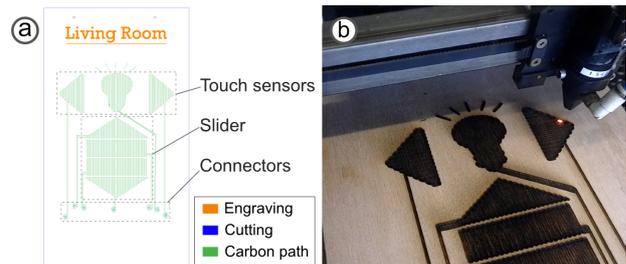


図 1. (a) タッチスイッチとスライダー搭載の壁掛けボードの設計例。(b) レーザーで木の表面に炭を生成し回路を作成する。木材の温度が上がりすぎないように、レーザーの焦点をぼかしている。

方式のレーザーを使用しているが、我々はベクタスキャン方式のレーザーを使用した。配線を主体とした回路パターンを作成する場合、ラスタスキャン方式だとパターンの全領域を走査する必要がある。一方で、ベクタスキャン方式は配線に沿ってレーザーを照射するため、回路作成に必要な時間が短くなる (詳細な比較は 7 節に示す)。fs レーザーを用いた手法の研究 [11] では、小型の回路や温度センサの試作を行っているが、fs レーザーは高価であり¹、ファブリケーションには不向きである。CW レーザー加工機を利用する我々の手法により、DIY ユーザでも容易に回路を作成することができる。

3 ファブリケーション手順

本節では、提案するファブリケーション手法の手順について説明する。使用したレーザー加工機は株式会社コマックスの VD7050-60W であり、パワーを 30-50 % (=18-30 W)、スピードを 25-30 % (=381-457 mm/s) に設定した。

3.1 回路パターン作成

まず、一般的な 2D グラフィクスエディタ (Adobe Illustrator など) や CAD を使用し回路パターンを作成する。図 1 (a) は複数のタッチスイッチとスライダーを搭載した壁掛けボードの設計例である。提案手法ではレーザーをベクタスキャンするため、導電部のパターンは全て線で構成される。タッチスイッチや PCB との接続部などの面積の大きい部分には楕円パターンを使用する。楕円の間隔は、炭配線を生成した際、線同士に隙間や過剰な重なりが生じないように決定する必要がある。これは焦点をぼかすためにレーザー加工機のステージを下げる距離に依存し、焦点位置から 5 mm 下に下げる場合は 1 mm 間隔、6mm 下げる場合は 1.25 mm 間隔であった。

3.2 レーザーによる炭化

回路パターン作成が完了したら、レーザー加工機にデータを送信する。一般的なラスタスキャンによるレーザー彫刻では、スキャンライン間に隙間が生じ、導電性の高い炭を生成することができない。

¹ CW レーザー加工機の価格は数十万円程度であるが、fs レーザー加工機は一千万円程度である。

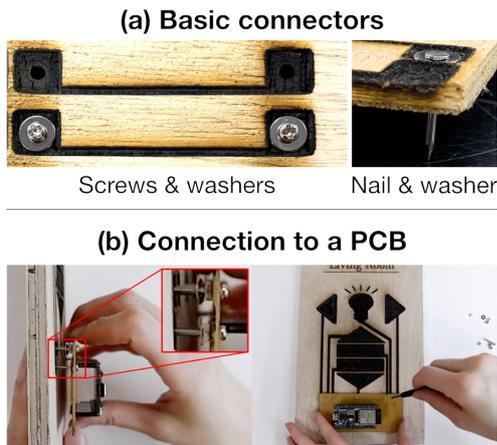


図 2. (a) 一般的なレーザーによる切断で炭配線に穴を開け、ネジとワッシャーで接続する。釘とワッシャーを使用することもできる。(b) マイコンを搭載した PCB と炭配線との接続。

一方、一般的なベクタスキャニングによるレーザー切断を使用すると木は焼けて切断されてしまい、十分な量の炭が生成しない。炭を十分に生成させ導電性のある配線を作成するためには、適度な熱を繰り返し与える必要がある。そこで、先行研究 [2] と同様にレーザー加工機のステージを下げ、焦点をぼかす方法を用いる (図 1 (b))。適切なぼかし距離は焦点距離から 5–6 mm 下であった。また、レーザー加工機のパワーを通常の切断時よりも低く、スピードを速く設定し繰り返しレーザーを照射した。これにより、導電性の高い炭を十分に生成できることを確認した。レーザーの繰り返し照射回数は 8–15 回が適当であった。以上のレーザーパラメータは、5.2 節で述べる技術評価の結果に基づいて決定した。

3.3 PCB との接続

最後に、一般的な金属ねじや釘を使用し、炭配線を電子部品や PCB に接続する。レーザー加工機やボール盤を使用し、炭配線の端子部分の中央に穴を開け、ねじや釘を差し込む。このとき、炭とねじとの接触面積を増やすため、ワッシャーやナットを利用している (図 2)。本論文の試作では、主に M2 のねじとナット、直径 6 mm のワッシャーを使用した。

4 CircWood

本節では、提案手法を用いることで可能となるセンサ機能と入出力について述べる。これにより、木の特性を生かした様々なインタラクションが実現できる。また金属ネジやヒンジなどの木工部品を利用し、通常の電子部品や PCB との接続が可能である。

4.1 センサ機能

タッチ/近接センシング, スライダー. 提案手法は、従来の静電容量式タッチセンサと同様の仕組み

でタッチセンシングを実現できる。炭で作られた電極を用意し、これに人体が近づくことで変化する静電容量値を利用し、人のタッチ検出ができる。

ダメージセンシング. 木の板は大きな衝撃を受けるとひび割れを起こす。この性質を利用し、割れなどの損傷を検出することができる。試作では、Vcc を固定抵抗と炭配線で分圧し、Arduino のデジタル入力端子に接続した。衝撃が加わり炭配線が断線すると抵抗値が無限大になるため、破損によるダメージを検出できる。

荷重/曲げセンシング. 木板が歪むと板上の炭配線の抵抗値が増減する。固定抵抗と炭配線とを直列接続した分圧回路を用意し、Arduino のアナログ入力端子に接続することで、炭配線にかかる歪みを検出できる。また、レーザ加工機により作成するリビングヒンジの裏に炭配線を作成し、その抵抗値の変化を測定することで、曲げの検出も可能である。

回転角センシング. 2 枚の木板に炭の電極を作成し、それらを向かい合わせに重ねることで、2 個の電極間の静電容量値から、重なり合った部分の大きさを検出できる。このとき、2 枚の木板をねじ止めすることで、回転角度の検出が可能である。また、2 枚の木板をスライドするよう取り付けすることで、摺動量の検出も可能である。例えば、木製の引き戸や窓とその戸袋の縁に炭による電極を作成することで、ユーザが引き戸を開閉する動作を検出できる。

4.2 木工部品との接続

炭配線のコネクタとして、ねじ、釘、ヒンジ、錠などの、DIY で頻繁に使われるさまざまな金属製の木工部品が使用できる。3.3 節で述べたように、PCB を炭配線に接続するためにねじ、釘、インサートナットなどを使用することができる。木板の両面にある 2 本の炭配線は、ねじとハトメを使用し接続できる。絶縁ステーブルは、他の炭配線との不要な接触を防ぐためのジャンパワイヤとして使用できる。また、ヒンジや錠、キャッチなどを使用し、2 枚の木板上の炭配線同士を接続可能である。引き戸に付いている金属のローラと戸袋の金属レールは、引き戸と戸袋に作成された炭配線同士を接続するために使うことができる。さらに、ドアノブ、取手、ドアノッカーは、これらの部品に人が接触したことを検出するために使用することができる。

5 炭化の最適化

5.1 適用可能な木材

提案手法を適用可能な木材を調査するため、さまざまな種類の木材を使用し 3 章の手順で炭を作成した。具体的には、ラワン合板と 8 種類の無垢材 (ラワン、ヒノキ、桐、スギ、シナ、ブナ、ナラ、ウォールナット) を使用した。また、燃焼を防ぎ炭素の発生を促す難燃剤を木材表面に塗布した場合の効果に



図 3. 木材表面に生成した炭配線の例。(a) 本手法が適用可能な木材。ラワンや難燃剤を塗布したヒノキは導電性を持つ炭配線を生成できる。(b) 本手法に不向きな木材。炭の粒同士に間隔があり配線が十分に黒くならず、導電性が低い。

についても検証した。難燃剤の成分はポリリン酸アンモニウムと硫酸アンモニウムであり、食品添加物なため環境にも人体にも無害である。

結果としては、ラワン材を用いて作成した炭の導電性が最も高く（面抵抗率：30–75 Ω /sq)²、提案手法に適した素材であることがわかった。また、ヒノキの無垢材でも、難燃剤を塗布することで導電性を有する（ \sim 76 Ω /sq）炭配線を作ることができた。ラワンの無垢材に難燃剤を塗布するとさらに導電性が向上したが（ \sim 25 Ω /sq）、ラワン合板に難燃剤を塗布した場合、導電性が低下した（ \sim 150 Ω /sq）。これは、合板の層の間にある接着剤の影響であると推測される。以上より、最適な木材は、難燃剤を塗布したラワン無垢材、次いでラワン合板、難燃剤を塗布したヒノキ無垢材となった。材料によって木の風合いやさまざまな特性が異なるため、プロジェクトに適した材料を選択することができる。

図 3 に木材表面に生成された炭配線の例を示す。図 3 (a) に示すように、導電性を有する炭配線は全体的に黒く、炭素の粒子で満たされている。一方、図 3 (b) に示すように、十分な導電性が得られなかった炭配線（450 Ω /sq–非導通）は茶色っぽく、炭の粒子の間に隙間が見られ、十分な炭が生成できなかった様子が伺われる。導電性が低い炭配線は、ブナ、カシ、ウォールナットなどの硬い木や、スギなどの軟らかい木から生成される傾向があった。一方、導電性を有する炭配線は、ラワンやヒノキなどの中程度の硬さの木材から生成される傾向があった。

5.2 レーザーパラメタ

厚さ 4 mm のラワン合板を用いて、導電性の高い炭を作成するためのレーザー加工機の最適な設定パラメタを調査した。この合板は表層の厚さが約 0.5 mm、中間層の厚さが約 3 mm であり、炭は主に中間層に発生した。この合板による炭は、実験したラワン合板の中で最も高い導電性を示した。前節で述べたように、導電性が低下するため、合板に難燃剤は塗布しなかった。使用したレーザー加工機は 3 節で述べたコマックス社の VD7050-60W である。

まず、焦点をぼかすためにレーザー加工機のス

テージを下げる距離の最適値を調査した。その結果、焦点距離から 5 mm 下げたとき、生成する炭配線の抵抗値が最も低くなることがわかった。レーザーの照射速度が低速な場合、レーザーのパワーを高くすると木が焼けてしまい、低くすると炭が発生しないなど調整が困難であったため、高速で繰り返し照射した。レーザーの最適な繰り返し照射回数を調査したところ、15 回目までは炭の抵抗値が低下し続けたが、16 回目には炭が焼け落ちて抵抗値が上昇することがわかった。以上までの調査で判明した焦点ぼかし距離とレーザー照射回数を最適条件（焦点距離から 5 mm 下、15 回繰り返し照射）として固定し、レーザーのパワーとスピードの最適値を調査した。結果としては、最も抵抗値が低かったのは 30 Ω /sq で、このときのパワーは 50 % (30 W)、スピードは 25 % (381 mm/s) であった。これらの設定値を最適パラメタとしてアプリケーションの実装時に使用した。

木材の種類が変わると最適パラメタにも若干の変化が見られた。厚手のラワン合板（1 mm 厚のベニヤ 3 枚と 3 mm 厚のベニヤ 2 枚が交互に重ねられている）とラワン無垢材では、パワーとスピードの最適パラメタは上述の値と同じであったが、最適なレーザーのぼかし距離は焦点距離から 6 mm 下であった。このとき、ラワン合板上に生成した炭の最小抵抗値は 75 Ω /sq であった。ラワン無垢材は難燃剤を塗布するとさらに抵抗値が下がり、最小抵抗値は 25 Ω /sq であった。難燃剤を塗布したヒノキを上述のパラメタで加工したところ燃えて切れてしまったため、最適パラメタのさらなる調査を行った。その結果、最適なぼかし距離は焦点から 5 mm 下であり、パワー 30 % (18 W)、スピード 30 % (457 mm/s) で 8 回レーザーを繰り返し照射することが最適であることがわかった。このときの最小抵抗値は 76 Ω /sq であった。以上の調査に基づき、表 1 に提案手法の最終的な推奨設定を示す。

6 応用例

6.1 タッチスイッチ付き壁掛けボード

提案手法はベクタスキャン方式のレーザーを使用しており、ラスタスキャン方式より大型の回路を高

² 作成した炭の抵抗値 (R) を測定し、面抵抗率 (R_s) を $R_s = R \times (\text{線幅} / \text{線長})$ の公式に従い計算した。

表 1. 提案手法の推奨パラメタ. 抵抗値は測定できた最小値を示す.

木材	難燃剤	パワー [W]	スピード [mm/s]	繰り返し	焦点ぼかし [mm]	抵抗値 [Ω /sq]
ラワン無垢	有	30	381	15	6	25
ラワン合板	無	30	381	15	5-6	30-75
ラワン無垢	無	30	381	15	6	65
ヒノキ無垢	有	18	457	8	5	76



図 4. (a) 調光ボード (ボード全体のサイズ: 255 mm×155 mm). 矢印型のスイッチをタッチして光の色を制御できる. (b) エアコンの制御ボード (ボード全体のサイズ: 167 mm×103 mm). スライダーに触れることで温度調節が可能である.

速に作成できる. よって, 3節で述べたような家電製品の制御ボードなど, スマートホーム向けのアプリケーション実装に適している. そこで, 図 4 に示すように, 室内の調光用とエアコンの制御用の 2 種類の壁掛けボードを実装した. それぞれのボードには Arduino を搭載した PCB が金属ねじで固定され, 同時にそのねじにより炭配線との接続が行われている. 調光用ボードでは, 電球型のタッチスイッチで RGB ランプを点灯・消灯し, 矢印型のタッチスイッチで光の色を変え, 上下のスライダーで明るさを調整できる. エアコン制御ボードには, 電源 ON/OFF 用のタッチスイッチと, 温度調節用のアナログタッチ式スライダーが搭載されている. タッチスイッチの実装には Arduino の Capacitive Sensing Library を使用した. 今回は壁掛けボードとして試作したが, 木製の壁全体に適用することで, より大規模な平面でのインタラクションも可能と考えている.

6.2 衝撃履歴検出ボックス

物流の用途に木箱が使われることがある. この木箱に提案手法を適用することで, 木箱自体に衝撃履歴を一度のみ検出する機能を付与できる. そこで, 木



図 5. 衝撃履歴検出ボックス. (a) 箱の底に炭配線が作成されている. 配線の破損はスマートフォンアプリで容易に検知できる. (b) 炭配線を介したタッチ入力検出される. (c) 衝撃を加えたところ, 炭配線が破損し衝撃履歴が検出された.

箱の裏面に炭配線を作成し, 大きな衝撃の履歴を検出する応用例を実装した (図 5). Off-Line Sensing [19] の技術と同様に, スマートフォンのタッチスクリーンでの静電容量センシングを利用して, 炭配線の破損を検出した. 配線が切れていない場合は, 炭配線の一端を指で触れ, もう一端をタッチスクリーンに接触させると, タッチスクリーン上でのタッチ入力が発生する. この機能は木製の建材表面や梯子などにも応用でき, 亀裂を検出することで劣化の検知が可能であると考えている. 加わる衝撃とそれに応じて破損する配線パターンとの関係については今後調査したい.

6.3 インタラクティブチェア

提案手法により, 木製の椅子の座面や背面に荷重センサを作成可能である. 図 6 (a) は, 健康に悪影響を及ぼす長時間の静的な着座を防止するインタラクティブチェアを示す. この椅子の座面の裏側には炭配線が作成されており, 人の着座により座面が歪むと配線の抵抗値が増加する³. この抵抗値の変化を読み取ることで, 着座状態を検出することができる. 長時間の着座を検出すると PC アプリケーションを介してユーザーに通知し, 姿勢を変えることを促す.

6.4 音量コントローラ

提案手法による回転角センサを利用し, ダイアル式の音量コントローラを実装した (図 6(b)). 半円状の電極が作成された 2 枚の木板を向かい合わせに配置しネジで固定すると, 2 個の電極が平行板可変容量コンデンサとして機能する. ユーザーが板を回転させると, 2 個の電極の重なる部分の面積が変化し, 静電容量値が変化する. よって, 板の回転による連

³ 初期状態では約 26k Ω であり, 420N 程度の座面への加圧で約 32 k Ω に変化した.



図 6. (a) インタラクティブチェア。座面の裏に炭配線が作成されている。長時間の静的な着座を検出すると、ユーザに通知を行い姿勢の変更を促す。(b) 木製の音量コントローラ。ダイヤルを回すことでスマートスピーカの音量を調節できる。

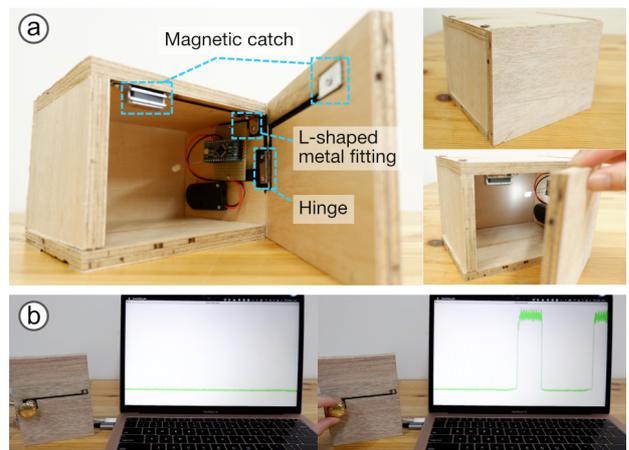


図 7. (a) 木製の収納ボックス。箱の内面に、マグネットキャッチ、ヒンジ、L字金具を用いて炭配線の閉回路を作成した。ユーザが扉を開けると閉回路が切断され、箱内部の LED が自動的に点灯する。(b) タッチセンシングが可能なドアノブ。

続的な静電容量値の変化を読み取ることで、スマートスピーカの音量を制御することができる。

6.5 木工部品を使用した木製品との接続

3.3 節で述べたように、提案手法は多様な木工部品を炭配線のコネクタとして使用できる。そこで、マグネットキャッチ、ヒンジ、L字金具をコネクタとして使用し、木製の収納ボックスを実装した(図7(a))。これら3個の部品は箱の内側の板の境界部分に設置されており、部品を介して異なる板上の炭配線が接続され、閉回路が形成されている。ユーザがこの箱を開けると、マグネットキャッチが分離し、閉回路が切断される。この電氣的な断線を Arduino で検出し、扉が開くと箱内部の LED が自動点灯するアプリケーションを実装した。この構成により、扉の開閉をネットワーク経由で通知する機能も容易に実装できる。本手法は配線材と電子部品を使用した回路作成と比較し、木材に馴染んだ実装が可能であり、PCB のように複数生産にも向いている。

金属製のドアノブによるタッチセンシングを利用し、ドアの開閉を検知することもできる(図7(b))。提案手法を木製のドアに適用することで、ドアに直接センシング機能を付加し、ドアノブを介した自然なタッチインタラクションを実現可能である。

7 議論と結論

ラスタスキャン方式のレーザーを用いてグラフェンを作成する既存技術 [2, 11] に比べ、提案手法ではベクタスキャン方式のレーザーを用いることで、大規模な炭による回路を短時間で作成することが可能である。このことを示すために、合計 1,000 mm 長の炭配線がある 100 mm 四方の回路パターン例

を作成する場合に要する時間を計算した⁴。論文に示されている情報によると、この回路を作製するためのレーザーのラスタスキャンラインの全長は、[2]⁵では 393,700 mm、[11]⁶では 236,200 mm である。[2] では、導電性が最も高い配線の作成に必要なレーザー速度は 150 mm/s で、3 回繰り返しスキャンをしている。よって、回路作成の所用時間は 7,874 秒 (393,700/150×3) である。また、[11] では、導電性が最も高い配線の作成に必要なレーザー速度は 10 mm/s でスキャン回数は 1 回である。よって、所要時間は 23,620 秒 (236,200/10) である。提案手法では、5.2 節で述べたように、最適なレーザー速度は 381 mm/s で、スキャンは 15 回繰り返される。よって所要時間は 39.4 秒 (1,000/381×15) となる。したがって、提案手法はラスタスキャンを用いる既存手法 [2] と比べると 200 倍、[11] と比べると 600 倍の高速化を実現した。

以上のように、本研究では、CW レーザー光の焦点をぼかし、繰り返しベクタスキャンを行う手法を提案し、レーザーによる炭の回路の作成を高速化した。また、DIY で使用される木工部品による接続手法も提案することで、炭による回路やセンサのファブリケーションが可能であることを示した。さらに、木材やレーザーパラメタなどの最適条件について調査し、ファブリケーションの際の指針を示した。そして、多様なセンサや回路を使用した応用例を実装し、生活空間内での木製品とのインタラクションを実現した。今後は配線パターンの設計支援ソフトウェアを実装予定である。また、異なるレーザー加工機での実現可能性、長期の耐久性、スケラビリティについて調査を行う予定である。

⁴ レーザーヘッドの帰線移動時間などは除く。

⁵ 100 mm 四方を 1000DPI でラスタスキャン。

⁶ 100 mm 四方を 600DPI 以上でラスタスキャン(線幅 40 μm として報告されている)。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 21J13365 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] V. P. C and D. Wigdor. Printem: Instant Printed Circuit Boards with Standard Office Printers & Inks. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15, pp. 243–251, 2015.
- [2] Y. Chyan, R. Ye, Y. Li, S. P. Singh, C. J. Arnusch, and J. M. Tour. Laser-Induced Graphene by Multiple Lasing: Toward Electronics on Cloth, Paper, and Food. *ACS Nano*, 12(3):2176–2183, 2018.
- [3] N.-W. Gong, J. Steimle, S. Olberding, S. Hodges, N. E. Gillian, Y. Kawahara, and J. A. Paradiso. PrintSense: A Versatile Sensing Technique to Support Multimodal Flexible Surface Interaction. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 1407–1410, 2014.
- [4] D. Groeger and J. Steimle. ObjectSkin: Augmenting Everyday Objects with Hydroprinted Touch Sensors and Displays. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, 1(4):134:1–134:23, 2018.
- [5] D. Groeger and J. Steimle. LASEC: Instant Fabrication of Stretchable Circuits Using a Laser Cutter. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, pp. 699:1–699:14, 2019.
- [6] A. Ishii, K. Kato, K. Ikematsu, Y. Kawahara, and I. Siio. Fabricating Wooden Circuit Boards by Laser Beam Machining. In *The Adjunct Publication of the 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '21 Adjunct, pp. 109–111, 2021.
- [7] Ç. Karataş and M. Gruteser. Printing multi-key touch interfaces. In *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, UbiComp '15, pp. 169–179, 2015.
- [8] Y. Kawahara, S. Hodges, B. S. Cook, C. Zhang, and G. D. Abowd. Instant Inkjet Circuits: Lab-based Inkjet Printing to Support Rapid Prototyping of UbiComp Devices. In *Proceedings of the 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, UbiComp '13, pp. 363–372, 2013.
- [9] A. Khan, J. S. Roo, T. Kraus, and J. Steimle. Soft Inkjet Circuits: Rapid Multi-Material Fabrication of Soft Circuits Using a Commodity Inkjet Printer. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, pp. 341–354, 2019.
- [10] K. Klamka, R. Dachsel, and J. Steimle. Rapid Iron-On User Interfaces: Hands-on Fabrication of Interactive Textile Prototypes. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, pp. 93:1–93:14, 2020.
- [11] T.-S. D. Le, S. Park, J. An, P. S. Lee, and Y.-J. Kim. Ultrafast Laser Pulses Enable One-Step Graphene Patterning on Woods and Leaves for Green Electronics. *Advanced Functional Materials*, 29(33):1902771, 2019.
- [12] H. Manabe and W. Yamada. A Capacitive Touch Sensing Technique with Series-connected Sensing Electrodes. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, pp. 645–654, 2017.
- [13] S. Mueller, B. Kruck, and P. Baudisch. LaserOrigami: Laser-Cutting 3D Objects. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '13, pp. 2585–2592, 2013.
- [14] S. Olberding, S. Soto Ortega, K. Hildebrandt, and J. Steimle. Foldio: Digital Fabrication of Interactive and Shape-Changing Objects With Foldable Printed Electronics. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15, pp. 223–232, 2015.
- [15] S. Olberding, M. Wessely, and J. Steimle. PrintScreen: Fabricating Highly Customizable Thin-film Touch-displays. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, pp. 281–290, 2014.
- [16] W. Pachler, J. Grosinger, W. Bösch, G. Holweg, K. Popovic, A. Blümel, and E. J. W. List-Kratochvil. A silver inkjet printed ferrite NFC antenna. In *2014 Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC)*, pp. 95–99, 2014.
- [17] K. Saito, T. Nakamura, K. Kamezawa, R. Ikeda, Y. Hashimoto, and B. Shizuki. Japanese Patterns as NFC Antennas for Interactive Urushiware. In *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '20, pp. 443–451, 2020.
- [18] V. Savage, X. Zhang, and B. Hartmann. Midas: Fabricating Custom Capacitive Touch Sensors to Prototype Interactive Objects. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, pp. 579–588, 2012.
- [19] M. Schmitz, M. Herbers, N. Dezfuli, S. Günther, and M. Mühlhäuser. Off-Line Sensing: Memorizing Interactions in Passive 3D-Printed Objects. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 182:1–182:8, 2018.
- [20] N. Segawa, K. Kato, and H. Manabe. Rapid Prototyping of Paper Electronics Using a Metal Leaf and Laser Printer. In *The Adjunct Publication of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, pp. 99–101, 2019.

- [21] T. Ta, M. Fukumoto, K. Narumi, S. Shino, Y. Kawahara, and T. Asami. Interconnection and double layer for flexible electronic circuit with instant inkjet circuits. In *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, UbiComp '15*, pp. 181–190, 2015.
- [22] M. Tsuruta, S. Nakamae, and B. Shizuki. Root-Cap: Touch Detection on Multi-electrodes using Single-line Connected Capacitive Sensing. In *Proceedings of the 2016 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces, ISS '16*, pp. 23–32, 2016.
- [23] U. Umapathi, H.-T. Chen, S. Mueller, L. Wall, A. Seufert, and P. Baudisch. LaserStacker: Fabricating 3D Objects by Laser Cutting and Welding. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '15*, pp. 575–582, 2015.
- [24] Y. Wang, J. Zhou, H. Li, T. Zhang, M. Gao, Z. Cheng, C. Yu, S. Patel, and Y. Shi. Flex-Touch: Enabling Large-Scale Interaction Sensing Beyond Touchscreens Using Flexible and Conductive Materials. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, 3(3):109:1–109:20, 2019.
- [25] M. Wessely, T. Sethapakdi, C. Castillo, J. C. Snowden, O. Hanton, I. P. S. Qamar, M. Fraser, A. Roudaut, and S. Mueller. Sprayable User Interfaces: Prototyping Large-Scale Interactive Surfaces with Sensors and Displays. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '20*, pp. 122:1–122:12, 2020.
- [26] R. Ye, Y. Chyan, J. Zhang, Y. Li, X. Han, C. Kittrell, and J. M. Tour. Laser-induced graphene formation on wood. *Advanced Materials*, 29(37):1702211, 2017.
- [27] Y. Zhang, G. Laput, and C. Harrison. Electric: Low-Cost Touch Sensing Using Electric Field Tomography. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '17*, pp. 1–14, 2017.
- [28] C. Zheng, H. Oh, L. Devendorf, and E. Y.-L. Do. Sensing Kirigami. In *Proceedings of the 2019 on Designing Interactive Systems Conference, DIS '19*, pp. 921–934, 2019.