

CWレーザー加工機による木板の炭化を利用した回路基板作成手法

石井 綾郁 加藤 邦拓 池松 香 川原 圭博 椎尾 一郎

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 (最小面抵抗率 $25 \Omega/\text{sq}$)。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ェン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、タッチセンサや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。

We propose a method and workflow for producing various sensors and electrical circuits for interactive devices by partially carbonizing the wood surface with a laser cutting machine. Similar to wiring on a conventional printed circuit board (PCB), the carbonized part functions as a conductive electrical path. A method for creating electronic circuits and sensors made of carbon graphene has been proposed. This technique makes use of a raster-scanning femtosecond (fs) laser, which is less common for personal fabrication than a constant-wave (CW) laser. Moreover, raster-scanning requires a substantial amount of time to create a circuit that is mainly made of conductive lines. This paper extends the method with a defocused vector-scanning CW laser beam and reduces the time and cost required for fabrication. The proposed method uses an affordable CW laser cutter to fabricate a circuit, including touch sensors, damage sensors, and load sensors on wood boards. The circuit can be easily connected to conventional PCBs and electric parts such as one-board microcomputers using metal screws and nails typically used in DIY woodworking.

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。本研究では、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。

フェムト秒 (fs) レーザー光をラスタスキャン (図 1 (a)、主に彫刻に用いられる加工方式) して木や葉の表面にグラフェンを生成し、これを使用した回路を作成する手法が提案されている [16]。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

Fabricating Printed Circuit Wooden-board using Affordable Laser Cutting Machine.

Ayaka Ishii, お茶の水女子大学, Ochanomizu University.

Kunihiro Kato, 東京工科大学, Tokyo University of Technology.

Kaori Ikematsu, ヤフー株式会社, Yahoo Japan Corporation.

Yoshihiro Kawahara, 東京大学, The University of Tokyo.

Itiro Sii, お茶の水女子大学, Ochanomizu University. コンピュータソフトウェア, Vol.40, No.2 (2023), pp.129-145.

[研究論文] 2022年2月28日受付.

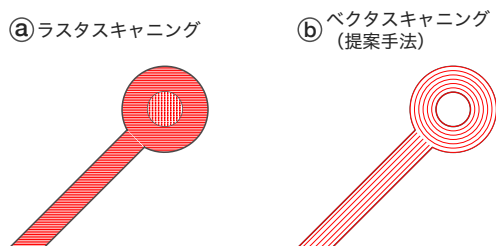


図 1 レーザー加工方式ごとのレーザー照射パスの比較。黒い線で囲まれた領域が加工対象領域である。(a) 一般的なレーザー加工で利用されるラスタスキャンニング。(b) 提案手法で利用するベクタスキャンニング。レーザー焦点をぼかすためパターン幅が拡張し、通常のベクタスキャンニングよりもパターン間隔が広くなる。

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加工に多大な時間を要する。本論文では、一般には切断に用いられることの多い、CW レーザーによるベクタスキャンニングを利用することで先行研究の手法を拡張する(図 1 (b))。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)ベクタスキャンニングを行う。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、タッチセンサや荷重センサなどのさまざまなセンサが実装できる。これらのセンサや回路は、木工 DIY で使用される金属のねじや釘を使うことで、一般的な PCB やマイコンなどに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。こうした資源の無駄が生じないサステナブルな方法により、素材を活かしたインタフェースを実現できる。

本稿では、提案手法による回路設計支援のために実装した、配線パターンの設計ソフトウェアについても報告する。また、木の材質やレーザーパラメタの最適化などを含む技術評価を行い、提案手法による回路の設計指針を示す。なお、本研究の一部について ACM TEI 2022 で登壇発表 [10] および ACM UIST 2021 でデモ発表 [9] を行った。本論文は [9][10] に加え、再現性や意匠性についての議論を加筆したものである。

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。最初期の例として、導電インクを充填したペンを使用し、紙に手書きすることで回路を描画する手法が提案されている [25][26]。その後、手書きではなくインクジェットプリンタで紙に導電インクを転写し回路パターンを印刷する手法が提案され、回路ファブリケーションの研究で盛んに用いられるようになった。この手法を最初に提案したのは Kawahara らであり、銀ナノ粒子インクを充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開発した [13]。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 [4][6][11][18][22][34]、NFC アンテナ [24]、積層回路 [32]、ディスプレイ [23] 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 [22]。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 [14]。

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。Wall++ [42]、FlexTouch [37]、Electrick [41]、Sprayable User Interfaces [38] では、導電性塗料を壁や家具に塗ったり吹き付けたりすることで、静電容量方式によるタッチ入力を可能にする。これらの既存技術では大規模な平面に手作業で導電物質を適用する必要があった。これを自動化するため、吊り下げ型ロボットにより自律的に回路を描画するシステムが提案されている [3]。

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 [28]。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

表 1 木材に適用可能な PCB のファブリケーション手法の比較. チェックマークは「該当」、ハイフンは「非該当」を表す.

ファブリケーション手法	回路の最大サイズ [cm]	手作業の必要性	DIYへの導入容易性 (コスト[万円])	環境負荷	抵抗値 [Ω /sq]
印刷, 水圧転写 [7]	42 (A3)	-	✓ (5)	-	0.3
手書き [26]	10	-	✓ (1)	✓	0.2
金属箔の貼り付け [1,28,31,40]	15	-	✓ (5)	-	0.03-0.2*
スプレー [39,42]	240	-	✓ (10)	-	0.1
ロボットによる自動描画 [3]	200	✓	✓ (20)	✓	2.5
Laser-induced graphene [16]	2	✓	- (1000)	✓	10
提案手法	70	✓	✓ (20)	✓	25

*素材（銅箔、金箔など）により異なる.

Printem フィルムを開発した [1]. また, カッティングプロッタで切断したプラスチックシートに銅テープを貼り付け, シートをハニカム構造に折り畳むことで, インタラクション可能な 3D オブジェクトを作成する手法も提案されている [39]. 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, 除去する際に細か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 [28]. 上記以外にも, 金箔 [27][30], 水圧転写技術 [7], 導電性フィラメントの 3D プリント [12][29][31][36], 導電性材料を塗布したナイロン繊維 [15], カーボンコート紙 [43], 液体金属 [33] 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. これまでに述べた回路ファブリケーション手法のうち, 木材に適用可能な技術の比較を表 1 に示す. 比較の指標は, 実装可能と報告されている回路の最大サイズ (縦または横の長さの上限値), 手作業の必要性, DIY のための設備の導入容易性^{†1}, 材料の浪費によ

る環境負荷, 回路配線の抵抗値である. 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, 提案手法では手作業の必要なく回路が作成できる. ロボットにより自動で回路を描画する手法 [3] では, ロボットを回路描画面に取り付けるために 20-30 分の手作業が必要である. シルクスクリーンやスプレー, 金属箔を貼り付ける手法などでは配線以外の部分に適用された塗料や箔が無駄になる. 提案手法では木そのものから生成する導電物質を利用しセンサや配線を作成するため, 資源の無駄が生じないサステナブルな方法で木を利用した回路を作成できる. また, 物体表面に導電材料を印刷/塗装する従来手法と比較し, 提案手法は CW レーザー加工機を使用した木工 DIY の作業フローに回路作成を組み込むことができる.

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 [20], 溶接して積層する [35], 半田付けする [21] などして, 3次元のオブジェクトをラビ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, 本研究と同様, レーザーの焦点を意図的にぼかした状態でベクタスキャングすることで, 素材を傷つけず特定の領域を加熱し,

†1 各先行研究の論文内で報告されている. 回路作成に必要な設備や物品の価格を調査し, 合計値の概算を表 1 中に記述した. 機能性インクなどの正確な価格が不明なものについては, 以下リンク先で価格を調査した. <https://www.sigmaaldrich.com>

折り曲げや溶接を実現している。他にも、レーザー加工した 2D 部品を組み立てることで 3D オブジェクトをラピッドプロトタイプングする手法 [17][19] や、薄いシートをレーザーで焼灼したり切断したりすることで柔軟性/伸縮性のある物体を作成する手法 [2][8] が提案されている。以上のような手法のうち、LASEC [8] では、一般的なレーザー加工機で透過性のある導電シートを切断し、伸縮性を持つ回路を作成している。提案手法では、人工的な導電材料を使用することなく、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 [5][16][40]。最初期の研究 [40] では、不活性ガスを使用して材料の燃焼を防ぐことで、木材表面でのグラフェンの生成を実現した。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 [5] と fs レーザーを 1 回照射する手法 [16] が提案され、不活性ガスを使用せずにグラフェンを作成可能になった。これに対し、提案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。十分な量の炭を生成させるためには、適切なエネルギー密度で加熱する必要がある。先行研究 [5][16][40] では炭化に適したレーザー照射調整を行った上で、パターンを全領域を走査する一般的なラスタスキャン機能を使用していた。本研究では、配線に沿った効率的なスキャン経路を自動生成するソフトウェアを開発し、レーザー加工機のベクタスキャン機能を使用した短時間での回路作成を実現した (図 1, 詳細な作成時間の比較は 7.1 節に示す)。レーザー加工機の稼働時間が短いほど、回路作成に必要な消費電力量も抑えることができる^{†2}。fs レーザーを用いた手法 [16] では、小型の回路や温度センサの試作を行っているが^{†3}、fs レーザーは高価であり^{†4}、ファブリケーションには不向きである。提案

手法では CW レーザー加工機を利用するため、DIY ユーザでも容易に回路を作成することができる。

3 回路設計とファブリケーション

本研究の提案手法では、CW レーザー加工機で木材表面を炭化させ、これを配線として使用し回路を作成する。このとき、レーザーの焦点をぼかした上でベクタスキャンを繰り返すことで、導電性を有する炭を生成する。この炭により作成したセンサや回路を、木工 DIY で使用される金属のねじや釘を用いて一般的な PCB やマイコンなどに接続し、多様なインタラクションを実現する。

本節では提案手法による配線パターンの設計および回路作成の手順を説明する。手順は大まかに 3 段階に分かれている。まず、設計支援ソフトウェアを使用して炭配線の設計を行う。次に、設計したパターン状にレーザー加工機で炭化を行い、回路の作成を行う。最後に、一般的な PCB やマイコンなどの外部配線との接続を行う。以下に、個々の手順の詳細を述べる。

3.1 設計支援ソフトウェア

本研究での回路パターンは一般的な PCB の回路パターンと同様、外部配線との接続用電極の周囲を囲う輪郭と、その電極を繋ぐための配線用のパスで構成される。また、接続用電極には外部配線や PCB を固定・接続するためのねじ穴を開ける必要がある。ユーザによる回路設計を支援するために、Rhinoceros と Grasshopper を用いて専用の回路パターン設計ツールを実装した (図 2)。

ユーザはまず、電極用パターンの外形とこれに接続する配線用のパスを描く。提案手法ではレーザーをベクタスキャンするため、回路パターンを全てパスで構成する必要がある。タッチスイッチや接続用端子などの面積の大きい部分には楕円パターンを使用する。実装したソフトウェアの機能により、ユーザが外形を指定すると、自動的にその外形を埋めるように楕円パターンが生成する。このとき、GUI のスライダーを使用することで楕円の間隔を調整することができる。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。

†2 提案手法では A4 サイズの回路を作成するのに約 300 Wh の電力を消費する。

†3 作成された回路の最大サイズは約 $2 \times 2 \text{ cm}^2$ であると報告されている。

†4 CW レーザー加工機は数十万円程度で入手可能であるが、fs レーザー加工機の価格は一千万円程度である。

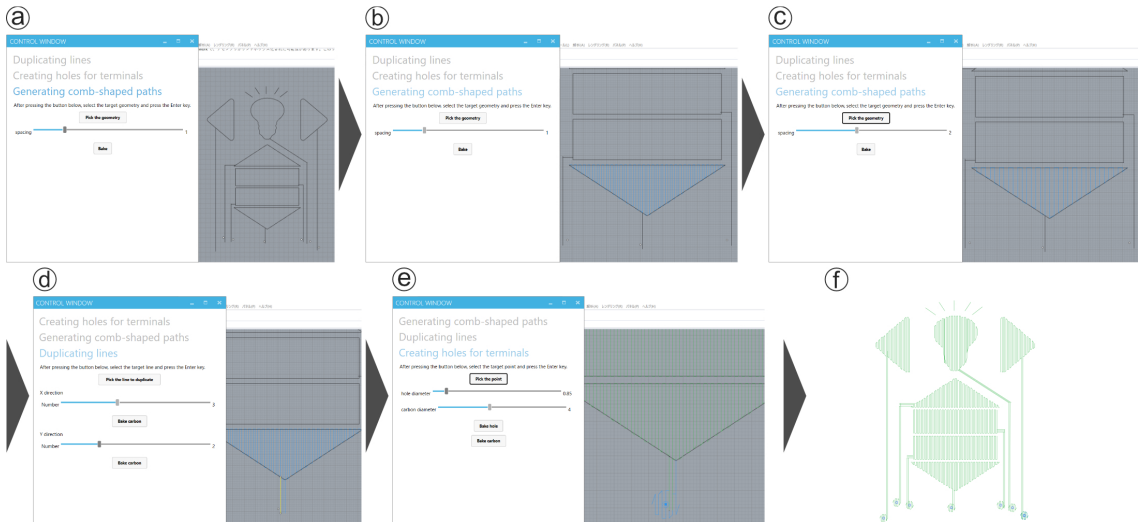


図 2 炭配線のパターン作成のためのソフトウェアツール。(a) 回路パターンの外形を描画する。(b) 描画された電極の輪郭内にベクタスキャン用の楕円パターンが自動的に生成される。(c) GUIのスライダーを使用して楕円パターンの間隔を調整することができる。(d) 配線用のパスは複製することで太さを調節することができる。(e) ねじ止めのための端子部を指定すると、レーザー切断用の円形パターンと、その周囲の炭化部分用の楕円パターンが自動的に生成される。(f) 炭配線パターンの完成例。

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 下げる場合は 1 mm 間隔、6 mm 下げる場合は 1.25 mm 間隔が最適であった。

提案手法では 1 本のパスで十分に導電性のある配線を作成できるが、スペースに余裕がある場合は、電気的特性を向上させるために配線を太くすることが望ましい。そこで、提案ソフトウェアに配線の太さを調節する機能を実装した。ユーザが対象となるパスを指定すると、自動的にパスを複製し横並びに等間隔で配置する。複製の数やパスの間隔は GUI のスライダーで調整できる。

接続端子部分にねじ穴を開けるための切断パターンと、その周囲の炭化部分用の楕円パターンもツールにより自動生成可能である。ねじ穴は外部配線や PCB をねじで固定するために使用され、穴の周囲の炭配線は、ねじと炭配線との電気的接続のために必要である。ユーザがねじ穴を開ける位置を指定すると、その位置を中心に円形のレーザー切断パターンが自動的に生成される。また、切断パターンの周囲にはねじとの接触部となる円形の楕円炭配線が自動的に生成

される。この切断パターンと楕円炭配線の大きさは、GUI のスライダーを使用して個別に調整できる。完成した設計ファイルは任意の形式で保存できる。今回は PDF/SVG ファイルで出力を行った。

3.2 ファブリケーション手順

部屋の照明を制御するための壁掛けボード (ボード全体のサイズ: 255 mm × 155 mm) のファブリケーション手順について説明する。壁掛けボードは 3 個のタッチスイッチ (1 個は照明の点灯/消灯用、2 個は照明色の選択用) と 1 個のスライダー (明るさ調整用) で構成されている。実際のボードの外観を図 8 に示す。使用したレーザー加工機は 60W CO₂ 気体レーザーを搭載した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。

3.2.1 レーザーによる炭化

回路パターンの作成が完了したら、レーザー加工機にデータを送信する。図 3 (a) に壁掛けボードの回路パターン設計例を示す。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

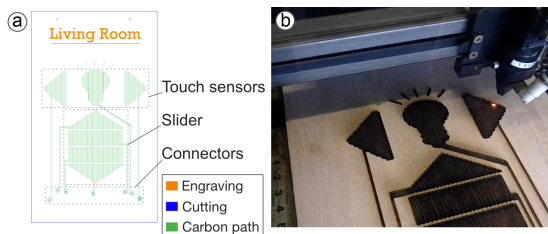


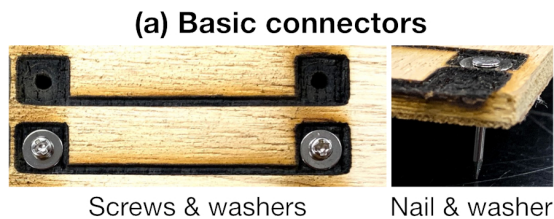
図 3 (a) タッチスイッチとスライダー搭載の壁掛けボードの設計例。(b) レーザーで木の表面に炭を生成し回路を作成する。木材の温度が上がりすぎないように、レーザーの焦点をぼかしている。

が生じ、導電性の高い炭を生成することができない。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 [5] 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 3 (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、5.1.2 節で述べる技術評価の結果に基づいて決定した。

なお、通常の切断/彫刻 (図 3 (a) 中の青色のパターン (切断パターン) およびオレンジ色のパターン (彫刻パターン) に該当) はレーザー焦点が合った状態で行う。前段階で炭作成のためにレーザー加工機のステージを下げた場合は、手作業でステージ位置を戻す必要がある。将来的には、ソフトウェア制御によりステージ高を調節可能なレーザー加工機を使用することで、炭配線の加工時に自動的にステージの高さを変更することを検討している。

3.2.2 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。設計ソフトウェアで端子部に指定した部分にはレーザー切断により穴が開けられており、ねじや釘を差し込めるようになってい



(b) Connection to a PCB

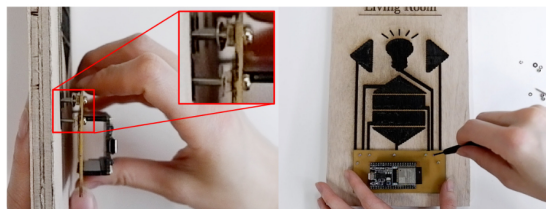


図 4 (a) 一般的なレーザーによる切断で炭配線に穴を開け、ねじとワッシャーで接続する。釘とワッシャーを使用することもできる。(b) マイコンを搭載した PCB と炭配線との接続。

る。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 4)。本研究での試作では、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 提案手法によるインタラクション

本節では、提案手法により可能となるインタラクション (図 5) について述べる。これにより、木の素材を活かした多様なインタラクションが実現できる。また、金属ねじやヒンジなどの一般的な木工部品を利用した、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

提案手法では、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。

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。よって、椅子の座面の

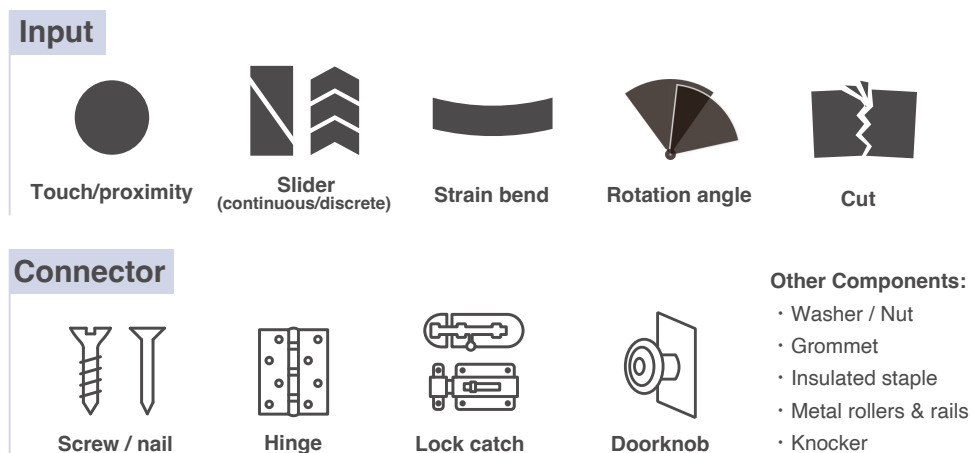


図 5 適用可能な入力要素 (タッチ/近接センサ, スライダー, 荷重/曲げセンサ, 回転角センサ, ダメージセンサ) とコネクタ要素 (ねじ/釘, ヒンジ, ロック/キャッチ, ドアノブなど).

裏に炭配線を作成し, 人の着座状態を検出するなどの応用例が実装できる. また, レーザ加工機で作成した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.

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.

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用

部品が使用できる. 3.2.2節で述べたように, PCBを炭配線に接続するためにねじ, 釘, ワッシャー, 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. 絶縁ステープルは, 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 技術評価

5.1 炭化の最適化

提案手法により木材表面に炭による回路を作成する際の設計指針を確立するため, 最適な木材の種類とレーザーカッターのパラメタ設定を調査した.

5.1.1 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, 複数種類の木材を使用し3.2章の手順で炭を作成した. 具体的には, ラワン合板, MDF, 9種類の無垢材(ラワン, ヒノキ, 桐, スギ, シナ, カシ, ブナ, ナラ, ウォールナット)を使用した. これらの使用木材は,



図 6 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。

入手性の高い木材(ラワン, ヒノキ, MDF, 桐, スギ, シナ, ウォールナット)であること, 一般的な炭の作成に使用される木材(カシ, プナ, ナラ)であることから選択した。また, 燃焼を防止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, 食品添加物の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)^{†5}, 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(～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(～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(～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 6 に木材表面に生成された炭配線の例を示す。図 6 (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 6 (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窺われる。導電性が低い炭配線は, プナ, カシ,

ウォールナットなどの硬い木や, スギなどの柔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。

5.1.2 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 3.2 節で述べたコマックス社の VD7050-60W である。調査対象のパラメタはレーザーの焦点ぼかし距離, 繰り返し照射回数, パワー, スピードの 4 項目であり, この順序でそれぞれの最適値を調査した。

まず, 焦点ぼかしのため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。本手法では, 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, 高速で繰り返しレーザーの照射を行う。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,

†5 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 2 各パワー/スピードでの平均抵抗値 [Ω/sq]. ラワン合板 (表層の厚さ 0.5 mm, 内部の層の厚さ 3 mm) を使用した. 空欄は 500 Ω/sq 以上であったことを示す. 括弧内の数値は標準偏差を示す.

Power (%) \ Speed (%)	20	30	40	50	60	70	80
50				174 (47.8)			
45				100.4 (16.5)	123 (25.3)	83.3 (25.8)	272.3 (117)
40				69.3 (11.7)	94.7 (4.7)	59 (15)	149.7 (85.8)
35				81 (18.7)	76.2 (5)	54.9 (10.7)	371 (305)
30				65.4 (46.3)	57.2 (17)	120.9 (50.6)	
25				53.4 (18.5)	67.4 (63.1)		
20			129.3 (26.9)				
15			340 (34.1)				
10	265.5 (167)	423 (182)					

た. この調査では, 同一のパワー/スピード設定値につき 4 本の炭配線を作成し, それぞれの抵抗値を測定してその平均値を求めた. 表 2 に各パワー/スピード設定値における平均抵抗値を示す. 全体として, パワーが 50–70% で, パワー : スピードの比率が 2 : 1 の場合に抵抗値が低くなる傾向があった. 測定中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ー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ー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ー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の面抵抗率は 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, 最小の面抵抗率は 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ータで加工したところ燃えて切断されてしまったため, 最適パラメー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. このときの最小の面抵抗率は 76 Ω/sq であった. 以上の調査に基づき, 表 3 に提案手法の最終的な推奨設定を示す.

5.2 木目による影響

これまでの調査では, 木目に沿って作成した炭配線を使用し実験を行ってきた. 木目が炭配線の抵抗値

表 3 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

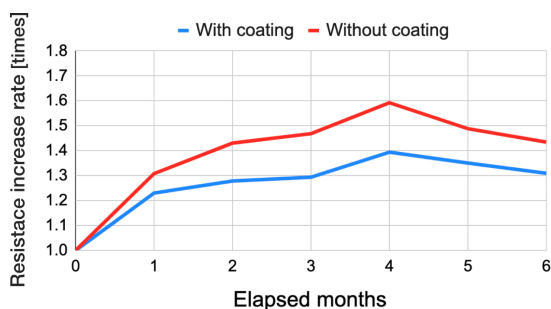


図 7 6ヶ月間の平均抵抗値上昇率の推移.

に与える影響を調査するため、厚手のラワン合板を使用し、前節で得られた最適パラメタを用いて、木目に直交する炭配線を作成した。その結果、木目に沿って作成した炭配線に比べて、抵抗値が大幅に上昇した (27,300 Ω /sq)。この問題は、炭配線を横並びに隣り合うように作成し、配線幅を広げることで解決できる。木目と直交するパスを3本横並びにすることで作成した炭配線の導電性は、木目に沿って作成した1本のパスによる炭配線の導電性とほぼ同等 (105 Ω /sq) であることを確認している。

5.3 抵抗値の経時変化

提案手法により作成した炭配線の抵抗値変化を長期間にわたり調査した。このとき、木工DIYで表面保護のために使用されるニス塗布することで炭の抵抗値上昇を抑制できると考え、ニスを塗布した炭配線の抵抗値変化も調査した。使用したのは油性のニススプレーである。表層0.5mm厚、内層3mm厚のラワン合板を使用し、ニスを塗布するサンプルと塗布しないサンプルの2条件で、それぞれ4本の炭配線を作成した。そして、各サンプルの抵抗値を半年間にわたって測定した。炭の作成に使用したレーザー

パラメタは5.1.2節で説明した最適値である。

図7に抵抗値の平均変化率の推移を示す。半年後、ニスを塗布しないサンプルの抵抗値は1.45倍^{†6}($SD = 0.08$)に、ニスを塗布したサンプルは1.3倍^{†7}($SD = 0.14$)に抵抗値が上昇した。グラフから、3ヶ月後には抵抗値が安定しつつあることが読み取れる。また、炭配線の作成当初では、ニスの有無による抵抗値の顕著な差は見られないが、ニスを塗布したサンプルの方が長期的な抵抗値上昇が抑えられている。さらに、ニスはコーティングにより回路の物理的強度を高め、炭によるタッチセンサに触れた際の汚れを防ぐという点でも有用である。

6 応用例

提案手法を利用して実装したさまざまな応用例を紹介する。本手法はパーソナルファブリケーションに使用されることを想定しているため、実装した応用例は主に一般的なDIYで作成可能な木工品を対象としている。

6.1 タッチスイッチ付き壁掛けボード

提案手法ではレーザー光をベクタスキャニングすることで炭による回路を作成するため、ラスタスキャニングより大型の回路を高速に作成できる。よって、3.2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8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

†6 初期状態で約56 Ω /sqの配線抵抗値が半年後に約82 Ω /sqに上昇した。

†7 初期状態で約51 Ω /sqの配線抵抗値が半年後に約66 Ω /sqに上昇した。

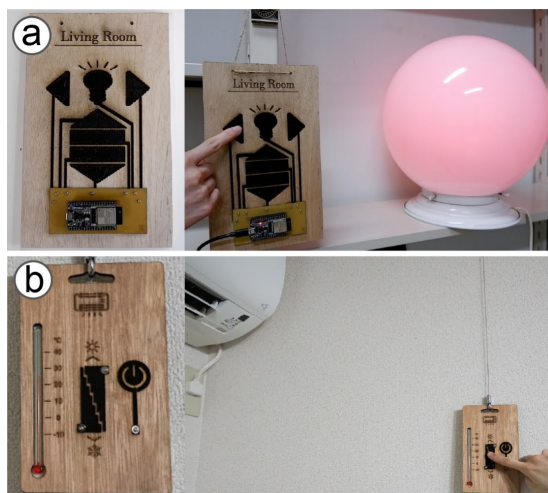


図 8 (a) 調光ボード (ボード全体のサイズ: 255 mm×155 mm). 矢印型のスイッチをタッチして光の色を制御できる. (b) エアコンの制御ボード (ボード全体のサイズ: 167 mm×103 mm). スライダーに触れることで温度調節が可能である.

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。

6.2 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 9 (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^{†8}。この抵抗値の変化を読み取り、適切な閾値を適用することで、人が着座しているか否かを判定することができる。長時間の着座

†8 初期状態では約 26 kΩ であり、420 N 程度の座面への加圧で約 32 kΩ に変化した。

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、起立するなどの姿勢の変更を促す。

木板への加圧をさらに強めていくと炭配線は断線する。この断線をセンシングすることで、大きな衝撃の履歴を検出できると考えている。将来的に、物流用途の木箱、木製の建材表面や梯子などに本手法を応用し、亀裂を検出することで劣化検知を行うことを検討している。

6.3 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、ダイヤル式の音量コントローラを実装した (図 9 (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ねじで固定すると、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。

6.4 木工部品を使用した木製品との接続

3.2.2 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 9 (c))。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。ユーザー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て、手作業による配線が不要である。そのため、一般的な PCB と同様に複数生産にも向いている。また、外観を損ねる配線材料が不要であり、かつ炭化部分を利用したセンシングが利用可能であるため、木材に馴染んだ実装が可能である。

金属製のドアノブによるタッチセンシングを利用

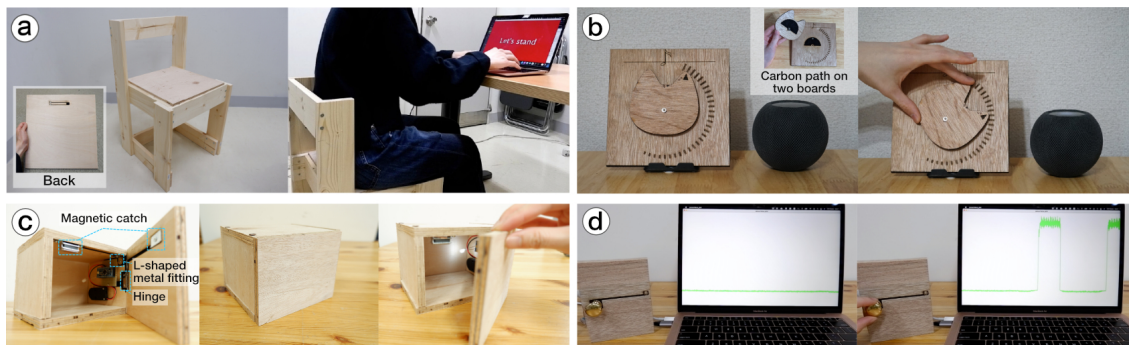


図9 (a) インタラクティブチェア。座面の裏に炭配線が作成されている。長時間の静的な着座を検出するとPCアプリケーションを介してユーザに通知を行い、起立するなどの姿勢の変更を促す。(b) 木製の音量コントローラ。ダイヤルを回すことでスマートスピーカの音量を調節できる。(c) 木製の収納ボックス。箱の内面に、マグネットキャッチ、ヒンジ、L字金具を用いて炭配線の閉回路を作成した。ユーザが扉を開けると閉回路が切断され、箱内部のLEDが自動的に点灯する。(d) タッチセンシングが可能なドアノブ。

し、ドアの開閉を検知することもできる(図9(d))。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 議論と制限

7.1 作成時間

レーザー光をラスタスキャンしてグラフェンを作成する既存技術 [5][16] に比べ、提案手法ではレーザー光をベクタスキャンすることで、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^{†9}。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、[5]^{†10}では 393,700 mm、[16]^{†11}では 236,200 mm である。[5]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 回繰り返して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 ($393,700/150 \times 3$) である。また、[16]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、5.1.2 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 ($1,000/381 \times 15$) 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 [5] と比べると 200 倍、[16] と比べると 600 倍の高速化を実現した。

7.2 解像度

提案手法ではレーザーの焦点をぼかしているため、焦点をぼかさな一般的ベクタスキャンと比較し配線幅が大きくなり、配線の線密度が低下する。5.1.2 節で説明した最適レーザーパラメータを用いて、焦点をぼかさな一般的ベクタスキャンを行ったところ、炭配線のパターン幅は約 0.3 mm、最小パターン間隔は約 0.5 mm (約 32 DPI) であった。これに対し、提案手法により焦点をぼかして作成された炭配線のパターン幅は約 1.2 mm で最小パターン間隔は約 0.5 mm (約 15 DPI) であった。

一方、前節で比較したレーザー光のラスタスキャンを用いてグラフェンを作成する先行研究 [5] の場合、パターン幅は約 1.2 mm でパターン間隔は約 0.3 mm であった。また、先行研究 [16] の場合、パターン幅は約 0.1 mm でパターン間隔は 40 μm であった。このように、特に [16] のようにレーザーの焦点をぼか

^{†9} レーザーヘッドの帰線移動時間などは除く。

^{†10} 100 mm 四方を 1000 DPI でラスタスキャン。

^{†11} 100 mm 四方を 600 DPI 以上でラスタスキャン (線幅 40 μm として報告されている)。

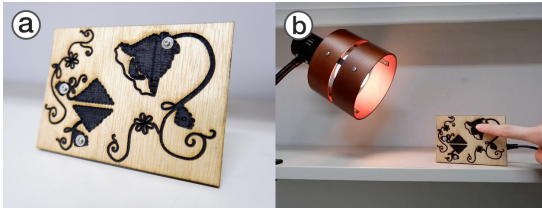


図 10 (a) 装飾的な炭配線によるタッチスイッチの例. (b) ランプを模した炭による電極をタッチすることで、実物のランプを点灯・消灯できる. 左側に位置する矢印型の電極をタッチすることで、ランプの明るさも制御できる.

さずに炭を作成する技術では線密度の高い配線を作成可能である. 今後、レーザーパラメタのさらなる調査を行い、焦点をぼかさな加工による高密度な配線を含む回路を作成することを検討している.

7.3 意匠性

提案手法特有の特徴として、レーザー加工による装飾性の高い木工作品に、回路機能を統合できることが挙げられる. 図 10 に装飾的な炭配線によるタッチスイッチの例を示す. 炭のパターン自体が装飾的なデザインになっており、ランプを模した炭による電極をタッチすることで、実物のランプを点灯・消灯できる. さらに、通常のレーザー切断や彫刻、焼き絵などと組み合わせることで、より多様な装飾が施されたセンシング機能のある木工品を作成可能である. このように、提案手法によって、木工作品の装飾表現に実用的な電子回路が統合されたインタフェースを実現できると考えている. このような回路はインタフェースとして使用されないときは装飾として木製品に溶けこむことが可能である. よって、本手法によりユビキタスコンピューティングやカーム・テクノロジーのビジョンに沿ったインタラクションの模索が可能であると考えている.

7.4 スケーラビリティ

作成可能な炭配線の長さはレーザー加工機の加工可能サイズに依存する. 今回の実験で使用したレーザー加工機 (VD7050-60W) は幅が 700 mm までの素材を加工することができる. 我々は長さ 700 mm の

炭配線を実際に作成し、これを使用したタッチ検出や荷重検出などが可能であることを確認した. このとき使用した木材は厚手のラワン合板であり、配線幅は約 1.2 mm、配線の抵抗値は約 23 k Ω で面抵抗率は 40.6 Ω /sq であった.

本論文ではレーザー加工機で加工可能なサイズ範囲を対象とした. 一方で、金属製の木工部品をコネクタとして使用し、作成した炭配線同士を接続することで、より大きな面へ提案手法を適用できると考えている. また、既存のポータブルレーザー加工機を使用し床や壁、木造住宅の柱などにセンサや配線を作成できれば、地震や継続的な振動による建物の損傷リスクの検出などへの応用も可能である. この場合、レーザー加工機の位置合わせを適切に行うための機構を開発する必要があり、手法のさらなる検討が必要である.

15 回の繰り返し加工によってラワン材に作成された炭配線は深さ約 1 mm の溝のような構造になっている. よって、本手法が適用可能なラワン材の厚さは最低でも 1 mm 以上となる. 難燃剤を塗布したヒノキの無垢材については炭配線部分に溝が生じなかったため、より薄い板を使用した回路作成が可能であると考えている.

7.5 再現性

本論文で主に使用したレーザー加工機は株式会社コマックスの VD7050-60W (60 W) であり、これを使用して提案手法の技術評価や応用例の作成を行った. また、30 W CO₂ 気体レーザを搭載した株式会社 FLUX のレーザー加工機である beamo を使用した場合にも、炭による木製回路基板を作成可能であることを確認した. このとき、使用した木材は厚さ 4 mm のラワン合板であり、レーザーを焦点から 9 mm ぼかし、パワー 40%(12 W)、スピード 5%(15 mm/s) の設定で 2 回繰り返し照射を行った. これにより、実際に動作するタッチスイッチを作成できることを確認した. 具体的には、Bare Conductive 社のマイコン (Light Up Board^{†12}) を使用し、マイコンのタッチセンシング用の電極と炭の配線部をねじとワッシャー

^{†12} <https://www.bareconductive.com/collections/light-up-board>

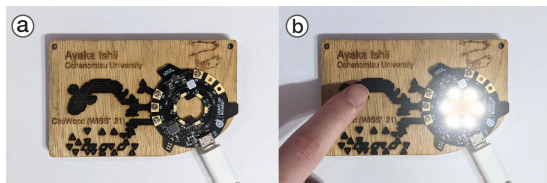


図 11 (a) beamo で作成した炭配線によるタッチスイッチ。マイコン左側に 3 個の炭によるタッチ用電極を作成した。(b) 中央の電極をタッチすることでマイコン内蔵 LED を点灯でき、最上部の電極をタッチすることで LED を消灯できる。最下部の電極をタッチすることで LED の明るさを強める制御が可能である。

で接続した回路を作成した。配線部の先にある炭の電極部への指の接触や近接を静電容量の変化から検出可能であることを確認した(図 11)。配線の面抵抗率は約 $14 \text{ k}\Omega/\text{sq}$ であった。その他のレーザー加工機に関しても、本研究で調査した最適パラメタで適用される熱量を目安にレーザー出力を調節することで、導電性を有する炭配線を作成可能であると考えている。

7.6 導電性

2.1 節で述べたように、提案手法による炭配線の抵抗値はプリント基板などの既存手法による配線の抵抗値よりも高い。したがって、提案手法は静電容量式タッチセンシング、歪み検出、破損検出などの用途に適している。また、炭配線の抵抗値は板の反りや割れ、内部組成などのさまざまな板材の条件に影響される。この場合、難燃剤の使用(ラワン合板を除く)や木目に沿った炭配線の作成などにより導電性を効果的に向上させ、抵抗値のばらつきをある程度抑えることができる。さらに、先行研究 [40] ではレーザー加工時に不活性ガスを使用し酸素を遮断することで、高い導電性を持つ安定したグラフェン構造が得られると報告されており、これを提案手法に適用することも検討している。現状では消費電力や電圧効果に敏感なアプリケーションを実現することは困難であるが、以上のような工夫により抵抗値を下げることで、より導電性の高い配線を必要とするアプリケーションを実現できると考えている。

7.7 耐久性

提案手法により作成したタッチスイッチは、約 0.05 N の力を 100 回以上連続して加えても動作することを確認した。また、作成した荷重センサは、約 431 N の力を 100 回以上連続して加えても機能し続けることを確認した。また、衝撃履歴検出ボックスを除くすべての応用例は、作成後約 8 ヶ月経過しても作成時と同様に動作することを確認した。5.3 節で述べた範囲での導電性の低下は見られたものの、断線することはなかった。このように、時間経過とともに抵抗値がわずかに変化するため、タッチセンシングや荷重センシングの際には、短時間での検出値の差を適切に補正して使用することが望ましい。

図 7 に示すように、4 ヶ月後には抵抗値の上昇は 1.6 倍程度で頭打ちとなり、50% 程度の抵抗値変化に耐えられる回路であれば、1-2 年は使用できると考えている。また、炭配線にニス塗布することで長期的な抵抗値の上昇も抑えられる。したがって、長期使用を前提とした木製回路を作成するには、最適なレーザーパラメタで炭配線を作成し、その上にニスを塗布することが望ましいと考えられる。

8 まとめ

本研究では、CW レーザーのベクタスキャニングを用いて木材表面に炭による回路やセンサを作成する手法を提案した。提案手法ではタッチセンサや荷重センサなどのさまざまなセンサが実装可能であり、これらの回路やセンサは木工 DIY で使用される金属ねじや釘を使用し一般的な PCB やマイコンなどに容易に接続できる。また、配線パターンを設計を支援するソフトウェアツールを実装した。さらに、炭配線作成のための木材やレーザーパラメタなどの最適条件を調査し、ファブリケーションの際の指針を示した。提案手法を用いて、生活空間内のさまざまな木材表面でのインタラクションの可能性を模索する応用例を複数実装した。

提案手法で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、資源の無駄が生じないサステナブルな回路作成が可能である。

また、一般的なレーザー木工と組み合わせた装飾的な回路が容易に作成できる。これにより、センサとして使用されないときは装飾として木製品に溶けこむようなインタフェース構築が可能である。

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] Chadalavada, V. P. and Wigdor, D.: 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, New York, NY, USA, ACM, 2015, pp. 243–251.
- [2] Chadalavada, V. P. and Wigdor, D.: Foldem: Heterogeneous Object Fabrication via Selective Ablation of Multi-Material Sheets, in *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, New York, NY, USA, ACM, 2016, pp. 5765–5775.
- [3] Cheng, T., Li, B., Zhang, Y., Li, Y., Ramey, C., Jung, E. M., Cui, Y., Swaminathan, S. G., Do, Y., Tentzeris, M., Abowd, G. D., and Oh, H.: Duco: Autonomous Large-Scale Direct-Circuit-Writing (DCW) on Vertical Everyday Surfaces Using A Scalable Hanging Plotter, in *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 5, No. 3 (2021), pp. 92:1–92:25.
- [4] Cheng, T., Narumi, K., Do, Y., Zhang, Y., Ta, T. D., Sasatani, T., Markvicka, E., Kawahara, Y., Yao, L., Abowd, G. D., and Oh, H.: Silver Tape: Inkjet-Printed Circuits Peeled-and-Transferred on Versatile Substrates, in *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 4, No. 1 (2020), pp. 6:1–6:17.
- [5] Chyan, Y., Ye, R., Li, Y., Singh, S. P., Arnusch, C. J., and Tour, J. M.: Laser-Induced Graphene by Multiple Lasing: Toward Electronics on Cloth, Paper, and Food, *ACS Nano*, Vol. 12, No. 3 (2018), pp. 2176–2183.
- [6] Gong, N.-W., Steimle, J., Olberding, S., Hodges, S., Gillian, N. E., Kawahara, Y., and Paradiso, J. A.: 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, New York, NY, USA, ACM, 2014, pp. 1407–1410.
- [7] Groeger, D. and Steimle, J.: ObjectSkin: Augmenting Everyday Objects with Hydroprinted Touch Sensors and Displays, in *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 1, No. 4 (2018), pp. 134:1–134:23.
- [8] Groeger, D. and Steimle, J.: 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, New York, NY, USA, ACM, 2019, pp. 699:1–699:14.
- [9] Ishii, A., Kato, K., Ikematsu, K., Kawahara, Y., and Siio, I.: Fabricating Wooden Circuit Boards by Laser Beam Machining, *The Adjunct Publication of the 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '21, New York, NY, USA, ACM, 2021, pp. 109–111.
- [10] Ishii, A., Kato, K., Ikematsu, K., Kawahara, Y., and Siio, I.: CircWood: Laser Printed Circuit Boards and Sensors for Affordable DIY Woodworking, *Sixteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '22, New York, NY, USA, ACM, 2022, pp. 11:1–11:11.
- [11] Karataş, C. and Gruteser, M.: Printing Multi-Key Touch Interfaces, in *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, UbiComp '15, New York, NY, USA, ACM, 2015, pp. 169–179.
- [12] Kato, K., Ikematsu, K., and Kawahara, Y.: CAPath: 3D-Printed Interfaces with Conductive Points in Grid Layout to Extend Capacitive Touch Inputs, in *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, Vol. 4, No. ISS(2020), pp. 193:1–193:17.
- [13] 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, in *Proceedings of the 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, UbiComp '13, New York, NY, USA, ACM, 2013, pp. 363–372.
- [14] Khan, A., Roo, J. S., Kraus, T., and Steimle, J.: 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, New York, NY, USA, ACM, 2019, pp. 341–354.
- [15] Klamka, K., Dachselt, R., and Steimle, J.: 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, New York, NY, USA, ACM, 2020, pp. 93:1–93:14.
- [16] Le, T.-S. D., Park, S., An, J., Lee, P. S., and Kim, Y.-J.: Ultrafast Laser Pulses Enable One-Step Graphene Patterning on Woods and Leaves for Green Electronics, *Advanced Functional Materials*, Vol. 29, No. 33 (2019), pp. 1902771:1–1902771:10.
- [17] Leen, D., Peek, N., and Ramakers, R.: Lami-Fold: Fabricating Objects with Integrated Mechanisms Using a Laser Cutter Lamination Workflow, in *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '20, New York, NY, USA, ACM, 2020, pp. 304–316.
- [18] Manabe, H. and Yamada, W.: A Capacitive

- tive Touch Sensing Technique with Series-connected Sensing Electrodes, in *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, New York, NY, USA, ACM, 2017, pp. 645–654.
- [19] McCrae, J., Umetani, N., and Singh, K.: Flat-FitFab: Interactive Modeling with Planar Sections, in *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, New York, NY, USA, ACM, 2014, pp. 13–22.
- [20] Mueller, S., Kruck, B., and Baudisch, P.: LaserOrigami: Laser-Cutting 3D Objects, in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '13, New York, NY, USA, ACM, 2013, pp. 2585–2592.
- [21] Nisser, M., Liao, C. C., Chai, Y., Adhikari, A., Hodges, S., and Mueller, S.: LaserFactory: A Laser Cutter-Based Electromechanical Assembly and Fabrication Platform to Make Functional Devices & Robots, in *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, New York, NY, USA, ACM, 2021, pp. 663:1–663:15.
- [22] Olberding, S., Soto Ortega, S., Hildebrandt, K., and Steimle, J.: 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, New York, NY, USA, ACM, 2015, pp. 223–232.
- [23] Olberding, S., Wessely, M., and Steimle, J.: PrintScreen: Fabricating Highly Customizable Thin-film Touch-displays, in *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, New York, NY, USA, ACM, 2014, pp. 281–290.
- [24] Pachler, W., Grosinger, J., Bösch, W., Holweg, G., Popovic, K., Blümel, A., and List-Kratochvil, E. J. W.: A Silver Inkjet Printed Ferrite NFC antenna, *2014 Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC)*, 2014, pp. 95–99.
- [25] Qi, J. and Buechley, L.: Electronic Popables: Exploring Paper-Based Computing through an Interactive Pop-up Book, in *Proceedings of the Fourth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '10, New York, NY, USA, ACM, 2010, pp. 121–128.
- [26] Russo, A., Ahn, B. Y., Adams, J. J., Duoss, E. B., Bernhard, J. T., and Lewis, J. A.: Pen-on-Paper Flexible Electronics, *Advanced Materials*, Vol. 23, No. 30 (2011), pp. 3426–3430.
- [27] Saito, K., Nakamura, T., Kamezawa, K., Ikeda, R., Hashimoto, Y., and Shizuki, B.: Japanese Patterns as NFC Antennas for Interactive Urushi-ware, in *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '20, New York, NY, USA, ACM, 2020, pp. 443–451.
- [28] Savage, V., Zhang, X., and Hartmann, B.: 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, New York, NY, USA, ACM, 2012, pp. 579–588.
- [29] Schmitz, M., Khalilbeigi, M., Balwierz, M., Lissermann, R., Mühlhäuser, M., and Steimle, J.: Capricate: A Fabrication Pipeline to Design and 3D Print Capacitive Touch Sensors for Interactive Objects, in *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15, New York, NY, USA, ACM, 2015, pp. 253–258.
- [30] 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, ACM, 2019, pp. 99–101.
- [31] Swaminathan, S., Ozutemiz, K. B., Majidi, C., and Hudson, S. E.: FiberWire: Embedding Electronic Function into 3D Printed Mechanically Strong, Lightweight Carbon Fiber Composite Objects, in *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, New York, NY, USA, ACM, 2019, pp. 567:1–567:11.
- [32] 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, in *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, UbiComp '15, New York, NY, USA, ACM, 2015, pp. 181–190.
- [33] Tokuda, Y., Sahoo, D. R., Jones, M., Subramanian, S., and Withana, A.: Flowcuits: Crafting Tangible and Interactive Electrical Components with Liquid Metal Circuits, in *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '21, New York, NY, USA, ACM, 2021, pp. 35:1–35:11.
- [34] Tsuruta, M., Nakamae, S., and Shizuki, B.: RootCap: 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, New York, NY, USA, ACM, 2016, pp. 23–32.
- [35] Umaphathi, U., Chen, H.-T., Mueller, S., Wall, L., Seufert, A., and Baudisch, P.: 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, New York, NY, USA, ACM, 2015, pp. 575–582.
- [36] Wang, G., Cheng, T., Do, Y., Yang, H., Tao, Y., Gu, J., An, B., and Yao, L.: Printed Paper Actuator: A Low-Cost Reversible Actuation and Sensing Method for Shape Changing Interfaces, in *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors*

tors in Computing Systems, CHI '18, New York, NY, USA, ACM, 2018, pp.569:1–569:12.

- [37] Wang, Y., Zhou, J., Li, H., Zhang, T., Gao, M., Cheng, Z., Yu, C., Patel, S., and Shi, Y.: FlexTouch: Enabling Large-Scale Interaction Sensing Beyond Touchscreens Using Flexible and Conductive Materials, in *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 3, No. 3 (2019), pp. 109:1–109:20.
- [38] Wessely, M., Sethapakdi, T., Castillo, C., Snowden, J. C., Hanton, O., Qamar, I. P. S., Fraser, M., Roudaut, A., and Mueller, S.: 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, New York, NY, USA, ACM, 2020, pp. 122:1–122:12.
- [39] Yamaoka, J., Dogan, M. D., Bulovic, K., Saito, K., Kawahara, Y., Kakehi, Y., and Mueller, S.: FoldTronics: Creating 3D Objects with Integrated Electronics Using Foldable Honeycomb Structures, in *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, New York, NY, USA, ACM, 2019, pp. 628:1–628:14.
- [40] Ye, R., Chyan, Y., Zhang, J., Li, Y., Han, X., Kittrell, C., and Tour, J. M.: Laser-Induced Graphene Formation on Wood, *Advanced Materials*, Vol. 29, No. 37 (2017), pp. 1702211:1–1702211:7.
- [41] Zhang, Y., Laput, G., and Harrison, C.: Electric: Low-Cost Touch Sensing Using Electric Field Tomography, in *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, New York, NY, USA, ACM, 2017, pp. 1–14.
- [42] Zhang, Y., Yang, C. J., Hudson, S. E., Harrison, C., and Sample, A.: Wall++: Room-Scale Interactive and Context-Aware Sensing, in *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, New York, NY, USA, ACM, 2018, pp. 273:1–273:15.
- [43] Zheng, C., Oh, H., Devendorf, L., and Do, E. Y.-L.: Sensing Kirigami, in *Proceedings of the 2019 on Designing Interactive Systems Conference*, DIS '19, New York, NY, USA, ACM, 2019, pp. 921–934.



石井綾郁

2020年3月お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科博士前期課程修了。2021年4月より日本学術振興会特別研究員 DC2。2022年3月お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科博士後期課程修了。博士(理学)。同年4月より NTT コミュニケーション科学基礎研究所研究員、現在に至

る。情報処理学会、ACM 各会員。



加藤邦拓

2018年明治大学大学院先端数理科学研究科先端メディアサイエンス専攻博士後期課程を修了。博士号(工学)。2018年東京大学大学院情報理工学研究科特任研究員。2020年東京工科大学メディア学部助手、2021年同大学助教、現在に至る。情報処理学会、ACM 各会員。



池松香

2019年お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科博士課程修了。博士(理学)。同年、ヤフー株式会社 Yahoo! JAPAN 研究所特任研究員。主任研究員を経て2021年より上席研究員。2020年より東北大学電気通信研究所助教を兼任。情報処理学会、ACM 各会員。



川原圭博

2000年東京大学工学部電子情報工学科卒。2002年同大学院修士課程了、2005年同博士課程了。博士(情報理工学)。2005年大学院情報理工学系研究助手。助教を経て、2010年同講師、2013年同准教授。2019年同教授。2011-2013年ジョージア工科大学客員研究員および MIT Media Lab 客員教員を兼任。電子情報通信学会、IEEE、ACM 各会員。



椎尾一郎

1979年名古屋大学理学部物理学科卒業。1984年東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。同年、日本アイ・ビー・エム株式会社東京基礎研究所研究員。1997年玉川大学工学部助教授をへて2002年教授。2001年ジョージア工科大学客員研究員。2005年お茶の水女子大学理学部情報科学科教授、2022年同名名誉教授。情報処理学会フェロー、工学博士。