

ConductAR：導電性インク回路の 試行錯誤的なデザインに向けたARツール

鳴海 紘也^{1,a)} 中原 健一¹ 川原 圭博¹

受付日 2016年12月26日, 採録日 2017年7月4日

概要：誰にでも入手可能で使いやすい導電性インクによって、子どもや芸術家、ものづくり愛好家などあらゆる人々が様々な回路を簡単に作製できるようになった。しかし、専門的な知識や道具を持たない人々が回路をデザインする際には、導電パターンの誤りをいかにして発見・修正するかという点が問題になる。単なる回路の短絡や開放だけでなく、導電線インク特有のシート抵抗などが回路の故障につながる場合も多く、使用者が導電性インク回路をその場で修正するのは難しい。そこで我々は、手描きまたは印刷された導電性インク回路を認識・解析・可視化するためのツール、ConductARを提案する。パソコンやタブレットに搭載されたカメラのみを用いて回路のシート抵抗値を計算するため、使用者は特別な道具を用いずに、スクリーン上での簡単な操作を通じて回路を理解・修正することができる。実装では、回路作製支援に十分な計算速度を維持しつつシート抵抗値の計算誤差を抑えるために、スパース・コーディングを利用した。また現実的なアプリケーションとして、回路の過電流検知機能・ヒータの電熱推定機能・複数のLEDを均一に点灯させる機能を実装した。さらに導電性インクペン・導電性インクの消しゴムとConductARを組み合わせた試行錯誤的な回路作製手法を提案し、ワークショップで頻発するLED駆動回路の問題を事前の設計なしに解決することによってその有効性を示した。

キーワード：導電性インク回路, ラピッド・プロトタイピング, ものづくり, 教育

ConductAR: An Augmented Reality Based Tool for Iterative Design of Conductive Ink Circuits

KOYA NARUMI^{1,a)} KENICHI NAKAHARA¹ YOSHIHIRO KAWAHARA¹

Received: December 26, 2016, Accepted: July 4, 2017

Abstract: A range of commercially viable and easy-to-use conductive inks allow novices, artists, and hobbyists to design and build interactive circuits quickly. Despite the ease with which practitioners can construct working circuits, one of the major limitations of designing circuits on-the-fly is the difficulty of detecting and understanding errors in prototype circuits. As well as short- and open-circuits, more subtle issues like high resistance traces can result in poor performance. Many users can't readily work out how to successfully modify their circuit, since they often don't have the tools or expertise for it. In this paper we present ConductAR, a tool which can recognize and analyze hand-drawn, printed, and hybrid conductive ink patterns. An on-screen augmented reality style interaction helps users to understand and enhance circuit operation. A key element of ConductAR is its ability to calculate the resistance of a circuit using a camera attached to an off-the-shelf PC or tablet. Our sparse coding technique is fast enough to support rapid iterative prototyping, and the maximum calculation error was under 7% according to the t-test. We demonstrated trial-and-error based design method which combines ConductAR with a conductive ink marker and/or eraser on real circuits.

Keywords: conductive ink, rapid prototyping, makers, education

¹ 東京大学
The University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-8654, Japan
^{a)} narumi@agk.t.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

近年、導電性インクを回路作製に利用することは、研究

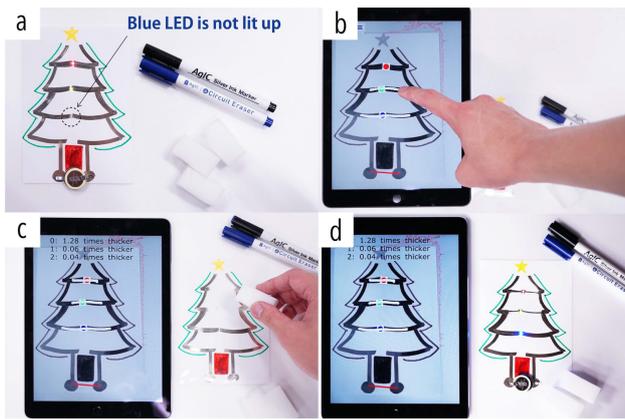


図 1 ConductAR で回路を修正する手順。 a：導電性インクで描かれた回路が正常に動作しない様子。 b：ConductAR によって回路パターンを認識し、修正したい箇所や素子を選択する。 c：回路の修正方法が提示される。 d：回路のペンと消しゴムにより修正を施した結果、回路が正常に動作する（文献 [5] より改変）

Fig. 1 Using ConductAR to modify circuit. a: Initial circuit created with conductive ink. b: ConductAR recognizes circuit traces and allows the user to select elements which can be modified. c: Suggested modifications are presented to the user. d: After modification with a conductive ink marker and eraser, the real circuit works successfully (modified from Ref. [5]).

者のコミュニティにとどまらず子どもや芸術家、ものづくり愛好家、教育者、学生などの間でも一般的になりつつある。このような回路作製手法が普及しつつある背景には、導電性インクがブレッドボードとプリント基板という従来の試作手法の「いいとこどり」をしているという事実が存在する。導電性インク回路はプリント基板の作製よりも低コストでかつ気軽である一方で、ブレッドボードよりもロボスタかつコンパクトであり作製した回路の複製も容易である。導電性インクペン [1] を用いることによって、ブレッドボードのように手作業で回路を作製することも可能であり、回路にスケッチをする・注釈をつける・切る・折る [2]・本の中にバインドする [3] など、幅広い使用方法が提案されている。

一方で、導電性インクには大きく 2 つの欠点が存在する。まず 1 つ目の欠点として、ブレッドボードでの作業などに使用される導線と比べて高い抵抗値がある。たとえば三菱製紙の銀ナノインク [4] の場合、シート抵抗値は最適条件で $0.29 \Omega/\text{sq.}^{\ast 1}$ （つまり $1 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ の線を引いた場合の抵抗値は 29Ω ）となる [1]。これは多くのアプリケーションにおいて無視できない大きさであり、それゆえに予期せぬ回路動作を引き起こしうる。頻繁に生じる事例をあげると、導電性インク回路において複数の LED を同じ明るさで光らせることは予想よりもはるかに難しい。また、パターンの発熱による紙の損傷・破壊なども起きる。さらに条件によっては、導電性インクの抵抗のためにまったく

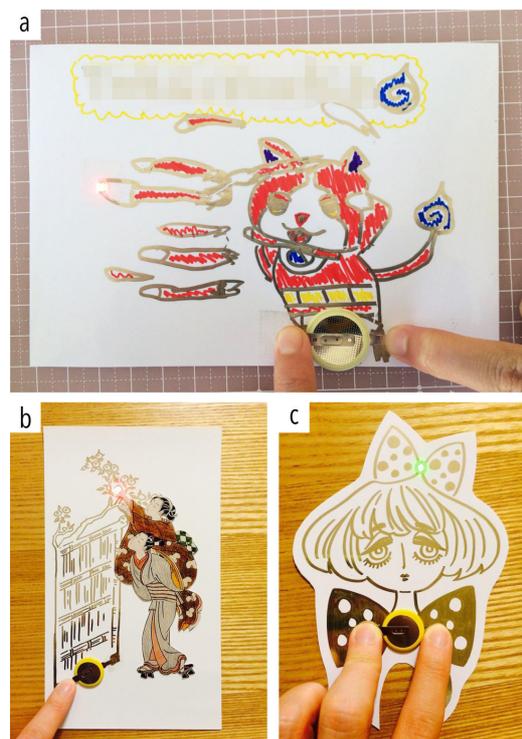


図 2 導電性インクペンで作製される回路の例。 a：典型的な手描き回路では、通常の色ペンを使った装飾がともなう。 b, c：回路パターンに機能性だけでなく芸術性が付加されているため、電気回路的な誤りが発生しやすい。1 度生じた誤りを修正する難易度も高い（文献 [5] より改変）

Fig. 2 a: Example conductive ink circuits made in a workshop with color pen. b, c: Hand-drawn circuits typically combine a functional circuit with artistic elements, which often introduces electrical errors. When this happens the complexity of the conductive pattern makes it hard to analyze and repair the circuit (modified from Ref. [5]).

動作しない回路が生じることもある。

導電性インク回路のもう 1 つの欠点は、1 度回路素子を描いてしまうと「やり直し」がきかないということである。いくら使用される材料が比較的 low コストだといえども、回路に小さな変更が生じるたびに初めから新しい回路を作製せざるをえないのは厄介である。我々の経験上、いかに電子回路に精通したデザイナーであっても作製時には回路を作り間違えてデザインを繰り返すため、試行錯誤を行うことのできるブレッドボードのようなツールが有用になる。学習プロセスとして試行錯誤が必須かつ重要となる学生にとってはなおさらである。

ワークショップを開催すると、導電性インクペンの使用者はしばしば、回路としての機能を意識せずに芸術的な作品を作製しようとする。たとえば図 2 に示すように、導電性インクの使用は回路を色付きのペンや印刷パターンで

^{\ast 1} $\Omega/\text{sq.}$ はシート抵抗値を表すための単位である。近似的に、シート型電極の 1:1 のアスペクト比に対する抵抗値と見なすことができる [1]。

装飾しようとする。それだけでなく、回路としての機能的な側面とデザインとしての芸術的な側面を組み合わせることで、導電性インクのパターン自体をも芸術的なものにしようとする。このような複雑な導電パターンは、「1 次元的で抵抗がほぼゼロの導線が回路素子どうしを結びつけている」従来の回路よりもはるかにデバッグしにくい。

本稿では、PC またはタブレットのカメラを使用して印刷または手描きの導電性インクパターンを認識するツール、ConductAR を提案する。ConductAR は各導電パターンのシート抵抗を計算し、導電性インク回路にまつわる問題を検知することによって回路を解析する。回路の解析には通常 1 分もかからず、結果が即座に提示されるため、使用者の試行錯誤的な作製を支援することができる。その後使用者は ConductAR からのフィードバックをもとに、導電性インクペンと導電性インクの消しゴムを使用して回路をその場で修正することができる。

以降の章では、まず回路の試作法・導電性インクを利用したアプリケーション・導電性インク回路の作成支援ツールについて関連研究を紹介する。次に ConductAR の設計における目標を提示し、これを達成するために基礎となるアルゴリズムについて説明する。さらにアルゴリズムを実装・評価し、具体的な回路修正のアプリケーションによってその有効性を示す。最後に、現実的な条件で使用する際の限界に触れて今後考えられる発展の方向性を述べる。

2. 関連研究

2.1 従来の回路試作ツール

ブレッドボードは回路を迅速かつ容易に作製・変更できるため、回路の試作において広く用いられているものの、一般的にはかさばり、ノイズや衝撃に弱い傾向がある [2], [6]。この点でプリント基板は有用な代替案となりうる。プリント基板は回路素子の配置に自由度があり、ロバストかつコンパクトな回路を作製することができる。しかし、プリント基板の設計・製造・組み立てには専門知識と時間が必要であり、結果として得られる回路を繰り返し変更するのは難しい [2], [6]。

2.2 導電性のテープ・ペースト・インク

プリント基板の代わりに、銅テープなどの導電性テープを使用して簡単な回路を作製することが可能である [3]。これは非常に手軽な方法ではあるものの、分解能に限界があり作製が面倒な場合もある。より簡単なアプローチとして、近年電子回路の試作向けに市販されている室温で使用できる導電性インクまたは導電性ペーストを利用する方法がある。たとえば Bare Paint [7] のようなカーボン系の導電性ペーストはブラシで塗布することができるが、細い回路パターンや小さな構造は作製できない。シート抵抗値も $50 \Omega/\text{sq}$ 程度と比較的高く、多くの用途には不適當である。

Circuit Scribe [8] は、Bare Paint と同様に通常の紙を含む多彩な基板の上に回路を描くことができる、ボールペンで使用可能な銀微粒子ペーストである。これはシート抵抗値が $0.4 \Omega/\text{sq}$ 程度と比較的低いので手描き回路の試作には便利な方法であるが、銀粒子のサイズは数百 μm 程度と大きいため、インクジェット印刷に利用することはできない。

我々はこれまで、三菱製紙の銀ナノ粒子インク [4] を用いた回路試作方法を提案してきた [1], [2], [9]。このインクは上述のカーボンおよび粒子サイズの大きな銀ベースのインクとは異なり任意の基材では使用できず、基材表面下の多孔質層がインクを化学焼結させるような特殊な用紙の上でのみ良好に機能する。一方でこのインクは、ペンだけではなくインクジェットプリンタに入れて使用することができるという利点を持つ。また、塗布されたインクのパターンは薄く柔軟性があり、 $0.29 \Omega/\text{sq}$ 程度のシート抵抗値しか持たない。

2.3 導電性インク回路を利用したアプリケーション

紙の基板の上に導電性インク回路を手描きまたは印刷する手法は、広範囲でインタラクティブなアプリケーションを実現する、たとえば Olberding らは、対象のサイズと形状に応じて自由に切り抜くことのできるタッチセンサのシートを実装している [10]。Extension Sticker は、スマートフォンなど既存のデバイスに搭載されたタッチセンサのサイズや向きを使用者の好みに合わせて拡張できるステッカである [11]。Karagozler らは、絵本に搭載できるような紙製のインタラクティブなエナジーハーベスティングツールを提案している [12]。PaperID では、使用者が自由に印刷したり手描きしたりできる RFID アンテナを用いて、様々なアプリケーションが提案されている [13]。

2.4 導電性インク回路の作製支援ツール

近年では、ハードウェアとソフトウェアの両面において導電性インク回路の作製を支援するようなツールが複数提案されている。

2.4.1 ハードウェア

導電性インクで作製した端子に表面実装部品を単純に貼り付けるために、導電性エポキシおよび導電性異方性転写テープ (Z テープ) を使用する手法が提案されている [1]。また Hodges らは、この貼り付けるプロセスをより容易に利用できるように、回路素子が一体化したステッカを提案した [6]。導電性粘土の Conductak は導電性エポキシや Z テープよりも繰り返しの試作が容易である一方で、もろくかさばる傾向がある [14]。

2.4.2 ソフトウェア

Ramakers らは、技術的スキルを持たないデザイナーがインタラクティブな入出力を持つ回路を印刷するための CAD ソフトウェアを提案している [15]。また、Lo らは、銅テー

プ・導電糸・導電性インクペンなどを用いた芸術的な回路作製を支援する CAD ソフトウェアを提案している [16]. しかし、この手法で作製できる回路は従来の導線で作製される回路のように「線」の回路に限定されており、後述する図 2 に示すような「面」の回路が頻繁に生じる導電性インク回路では利用が難しい。また、これら 2 つのツールは 1 度作製された回路をあとから修正することができない。

2.5 導電性インクを用いた繰り返しの回路作製

導電性インク回路の手軽さやコンパクトさといった利点を維持しつつ、ブレッドボードのような繰り返しの試作を可能にするための研究が報告され始めている。

AgIC 株式会社は、印刷または手描きの銀ナノインク回路を消去するペン型のツール Erasable Circuit Marker [17] を商品化した。しかし、このマーカは先端部に付着した銀ナノインクが紙の表面を汚すことがあり、大きなパターンを修正するには適していない。

一方我々は、エタノールに浸したメラミンスポンジを用いて銀ナノインクのパターンを消去する方法を提案している [18]. この方法は紙基材の表面の損傷を最小限に抑えるので、ユーザが同じ場所の銀ナノインクを何度も消して描きなおすことが可能である。また、メラミンスポンジ先端の銀ナノインクが付着した部分は自然に削り落ちるため、紙表面に汚れが残る可能性は低い。

その他、Wang らは CircuitStack の中で、印刷された導電性インク回路とブレッドボードを積み重ねることによって、ブレッドボードの欠点であった配線の煩雑さを解消しつつ、利点であった試行錯誤的な作業を可能にしている [19].

2.6 ConductAR の必要性

前節で紹介した Erasable Circuit Marker や Circuit Eraser を使用すると、印刷または手描きされた導電性インク回路を消して描き直すことが可能となるため、導電性インク回路において繰り返しの試作が可能となる。そのため、1 度回路の誤りを発見しその解決策を見出すことができれば、必要に応じて導電パターンを追加したり削除したりするのは非常に簡単である。しかし、回路を修正するための知識や道具を持たない人々にとって、回路の問題を発見し解決策を見出すことは必ずしも容易ではない。

この問題を改善するためには、手描き回路の誤りを検知するための何らかの支援を行う必要がある。そのようなツールとしては、前節までで紹介した CAD [15], [16] が候補にあがるが、それらはワークショップなどで見られる典型的な 2 次元の手描き回路に対応することができない。また、1 度作製した回路をその場で修正することはできない。回路の作製中はデザインに集中できることが理想であり、作製と作製の合間に GUI 上でデザインを行うというよう

な方針は導電性インクの気軽さを損なう可能性が高い。

我々は、コンピュータ支援を行いながらも芸術的な回路作製のプロセスを妨害しないという目標を達成するために、FreeD [20] を参考にした。FreeD は彫刻の製作中にリアルタイムでコンピュータの支援を受けられる彫刻刀であり、あらかじめ設計された CAD データに応じて刃先の長さを変化させつつ、同時にユーザの自由意思に基づく造形をある程度許容する。本稿ではコンピュータの支援を受けながら同時に導電性インク回路を修正する手法を提案するが、その際には、回路の作製に失敗するたびにパソコンで設計をし直す、といったプロセスを踏まずに直接回路作製を続けられる手法を目標とする。

3. ConductAR の設計と実装

3.1 設計指針

ConductAR に求められる目標は以下の 7 つにまとめられる。

1. 任意の 2 次元的な導電性インク回路を解析できること
2. 特別な道具を用いず、スマートフォン・タブレット・PC のような普及したデバイスのみを用いて解析できること
3. 描き（直し）-テスト-解析という試行錯誤のサイクルに対応すること
4. 将来的に新しい素子や異なる電源に対応できるような拡張性のあるアルゴリズムであること
5. 複数の種類の導電性インクに対して同じアルゴリズムを適用できること
6. 回路の初心者でも使用できる程度に単純な操作であること
7. マルチメータなど従来の計測機器を使わなくても、ある程度正確な解析が行えること

3.2 回路のモデル化

上記の目標を達成するような解析ツールを実装するにあたり大きく 2 つの課題が存在する。1 つ目の課題は、手描き回路に含まれる各パターンの抵抗値を、既存の広く普及したデバイスで可能な手法に基づいて解析する必要があるということである。2 つ目の課題は、スマートフォンのような限られた計算資源においても素早く動作するように、解析の計算複雑性を下げる必要があるということである。

以下の項では、抵抗値を計算するために 2 つの基本的な手法を比較・評価する。

3.2.1 グラフ化

1 つ目の手法は、認識した回路を理想化されたグラフに変換する方法である。たとえば図 3 左のように、取得した導電性インク回路の画像を認識して、それを図 3 右の理想的な回路図に置き換える。具体的には回路の枝に、抵抗・太さゼロの導線・導電性インクのシート抵抗を表す抵

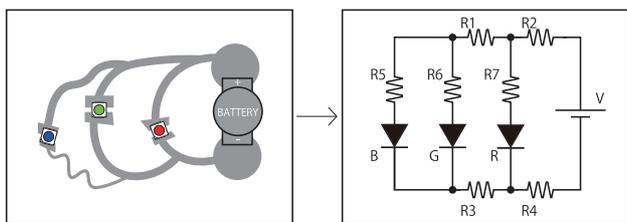


図 3 グラフ化の模式図. 左に示す導電性インク回路を右に示す回路のグラフに変換する. R1 から R7 までの抵抗はそれぞれの枝に存在する導電性インクのシート抵抗に対応している [5]

Fig. 3 Graphification method. We can convert a conductive ink circuit like the one shown on the left into a graph as shown on the right. The resistors R1 to R7 represent the parasitic resistances intrinsic to each branch between nodes. We can analytically solve all the parameters, i.e. resistance, voltage and current, from this graph [5].

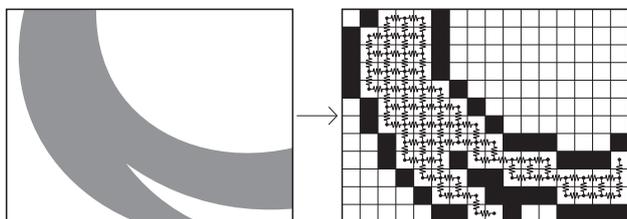


図 4 有限要素法の模式図. 導電性インクのパターンを導電ピクセルに分割し, それぞれのピクセルを 4 近傍と定数の抵抗を介して結合する. 抵抗値は使用するインクによって決まる定数である [5]

Fig. 4 Finite element method. Any given circuit is divided into a group of pixels. The conductive pixels are considered to be connected to their 4-neighbours with a unit constant resistance inherent to the sheet resistance of the conductive ink used [5].

抗器・実際に置かれている電源や種々の回路素子などを配置し, 画像中の回路が枝分かれする部分を節点とするという方法である. これを行えば, 任意の節点電位と枝電流について, 回路を解析的に解くことが可能となる (ただし, 素子が線形素子でない場合は数値的解法になりうる).

3.2.2 有限要素法

2つ目の手法は, 有限要素法による数値解析である. これは, 図 4 のように, 認識した画像をピクセルに分割し, そのピクセルが, 互いに隣接する近傍に対して一定値の抵抗器を持つようにモデル化する方法である. 本稿では 4 近傍のピクセルと結合するようにモデル化しているが, 実際には電流は 360 度どの方向にでも流れることができるため, これは近似的な手法である. また, 実際にはピクセルは無限小であり, 本稿では有限の大きさのピクセルで近似していることになる.

3.2.3 2つの手法の比較

表 1 にグラフ化と有限要素法の比較を概略する. グラフ化に関しては, 画像から節点の位置とシート抵抗を完

表 1 抵抗値を計算するための 2つの手法の比較. グラフ化は回路の変換が正確に行えれば高精度であるが, 接点間のシート抵抗を求めることが難しいために現実的ではない. 有限要素法は抵抗値が一定であるため扱いやすい [5]

Table 1 Comparison of two methods for resistance calculation. Overall, graphication is more accurate at modelling a circuit – but it relies on (1) resistance values which are more easily calculated using FEM and (2) accurately detecting the position of nodes [5].

	グラフ化	有限要素法
精度	解析的	数値的
抵抗値	可変	一定
拡張性	低い	高い

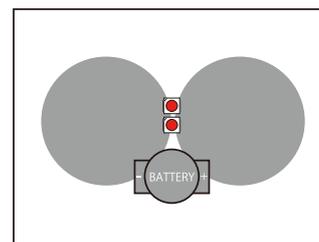


図 5 グラフ化によって認識できない回路の例. 2つの LED と 1つの電池で構成される回路であるが, 節点と接点間の抵抗値を同時に決定することは困難である [5]

Fig. 5 An example circuit which cannot be recognized by graphication. This is a parallel circuit composed of two LEDs and one battery. However, it is difficult to isolate nodes to distinguish (1) the branches to each LED or (2) the resistance between nodes [5].

全に把握できれば非常に精度良く各パラメータを得られるが, 節点認識・抵抗認識を正確に行うのは使用する計算資源と計算時間を考えると難しい. たとえば Noris らは, 1024^2 ピクセルの手書き線画のラスターイメージから節点と枝の位置を正確に判断するために, 4GB RAM を備えた Quad-Core 2.66 GHz Mac Pro を使用しており, その場合でも計算に 24 秒を必要としている [21]. また, 2次元的に広がる回路では, 図 5 のように, そもそも節点や枝がどこか分からないような場合も存在する. さらに, シート抵抗を導線と 1つの抵抗器に置き換えてしまうと, 線路上の節点以外の場所における各種パラメータが分からなくなってしまいう問題もある.

一方, 有限要素法による解法では, 近似の方法によっては計算精度が犠牲になる可能性があるものの, 実装が容易であり, どのような形状をした回路が対象であったとしても任意の点における回路パラメータが取得できるという利点がある. また, ピクセルの解像度を変化させることによって, 計算精度と計算速度のトレードオフを簡単に調整できるため, 実装するデバイスに合わせた最適化が容易である. 本稿ではピクセルサイズを調整することによって, 同様のアルゴリズムを iPad Air 2 と MacBook Pro に移植

することができた。

以上の考察から、本稿では有限要素法を用いて回路の数値解析を行うこととした。

3.3 有限要素法による抵抗値推定の実装

この節では、ConductARの基本機能である任意の2点間における抵抗値推定機能の数学的説明を行う。まず、図4に示したように、パターンをピクセルに分割し、4近傍のピクセルどうしが互いに結合する部分にそれぞれ一定値の抵抗器が存在するようにモデル化する。次に、抵抗計測の始点と終点のピクセルを指定して、そこに特定の値(抵抗値計算の過程で消えるので任意の値でよい)の電流を流した場合に、各ピクセルにどれだけの電圧がかかるかを節点解析法によって計算する。

このとき合計のピクセル数 n に対して、各ピクセルに流入する電流ベクトルを $\mathbf{i} \in \mathbb{R}^n$ 、各ピクセルにかかる節点電圧ベクトルを $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^n$ 、節点行列を $\mathbf{G} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ とおくと

$$\underbrace{\begin{bmatrix} g_{11} & -g_{12} & \cdots & -g_{1n} \\ -g_{21} & g_{22} & \cdots & -g_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -g_{n1} & -g_{n2} & \cdots & g_{nn} \end{bmatrix}}_{\mathbf{G}} \underbrace{\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix}}_{\mathbf{v}} = \underbrace{\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix}}_{\mathbf{i}}$$

と表せる。ここで、 \mathbf{i} は多くとも、電流源を付加したピクセルの要素数(電流源が1つなのでプラスマイナスの2つ)しか非零の値を持たないスパースなベクトルとなる。また、 \mathbf{G} の i 行 j 列目 ($i, j \leq n$)の要素 g_{ij} は、あるピクセルから隣接するピクセルに移動する際の単位コンダクタンスを g とおくと

$$g_{ij} = \begin{cases} \text{Sum of adjacent conductance} & (i = j) \\ \text{Conductance from pixel } i \text{ to pixel } j & (i \neq j) \end{cases}$$

$$= \begin{cases} g, 2g, 3g, \text{ or } 4g & (i = j) \\ 0 \text{ or } g & (i \neq j) \end{cases}$$

として求められる。今、節点方程式の未知数は \mathbf{v} だけなので、逆行列問題を解くと \mathbf{v} が得られる。よって、ピクセル i からピクセル j までの抵抗値は以下のように与えられる。

$$\mathbf{v} = \mathbf{G}^{-1} \mathbf{i}$$

$$r_{ij} = \frac{v_i - v_j}{i_j}$$

ここで、通常の計算の際には節点行列の保持には $O(n^2)$ の空間計算量が必要だが、 \mathbf{G} が各行に多くとも対角要素と4近傍のコンダクタンス値しか非零要素を持たないという性質を利用すると、 $O(n)$ ですむ。また、 \mathbf{i} も非常にスパースなベクトルであるから、スパース性を利用したアルゴリズムを用いることで時間計算量も短くなる。本稿の実装では、

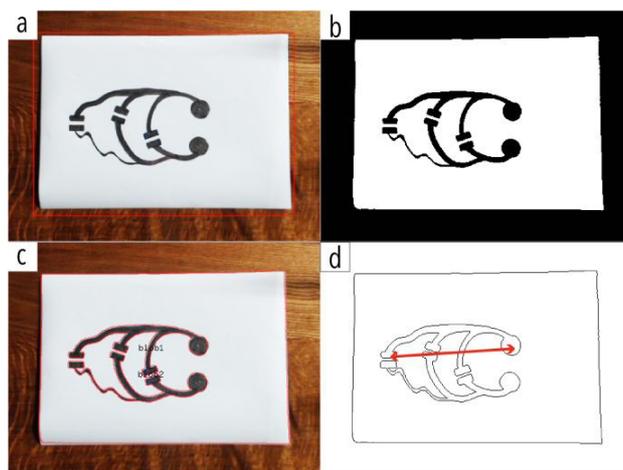


図6 抵抗値計算の流れ。a: 画面に表示される枠に合わせて回路画像を取得する。b: 二値化する。c: 輪郭を検出し、元の画像と重ねる。d: 2点を選択し、その間の抵抗値を計算する [5]

Fig. 6 The sequence of calculating resistance. a: A photographic image of the circuit. b: Binarized image. c: Extracted contours are overlaid on the original image. d: Two points are selected and the resistance between them calculated [5].

逆行列計算にはC++ライブラリEigenのSparseLUをソルバとして用いた。

3.4 抵抗値推定の手順

図6に、抵抗値推定に必要な手順を示す。

1. PCまたはタブレットに搭載されたカメラで導電性インクのパターンを含む紙の画像を取得する。
2. 画像を二値化する。
3. 輪郭検出を行って単純閉曲線を検出し、それを導電性インクのパターンと見なす。ただしある導電性インクの面に入る輪郭、偶数番目の輪郭を紙の面に入る輪郭と見なすことに注意する。
4. 使用者に抵抗値推定の開始位置と終了位置を決定するように促し、抵抗値を計算する。

4. 評価実験

この章では、導電性インク回路上の任意の2点間の抵抗を計算する基本的な機能を、その精度と速度に関して実験・評価する。これ以降、銀ナノ粒子インクNBSIJ-MU01と三菱製紙製のコート紙NB-RC-3GR120 [4]を用いてこれらの実験を行った。画像認識と計算は、Logicool C920ウェブカメラを接続したデュアルコア2.4GHz Mac Book Pro (RAM 8GB) を使用して行った。

4.1 精度の評価

まず、図7左に示すパターンを文献[1]の手法で印刷し、

画像認識した。その際、格子点の中からランダムに2点を選択して、その2点から見た抵抗値を計算した。その後テストを用いて抵抗値を実測し、計算値と比較した。30回の計測を行った結果を図7右に示す。横軸は実測値、縦軸は計算値である。また、これらの標本値から

$$ER = \text{abs} \left(\frac{\text{calculated value} - \text{measured value}}{\text{measured value}} \right) \times 100$$

により計算される誤差の母平均は、t検定の結果7%未満となった(有意水準5%)。この誤差が生じた原因は、4近傍モデルへの近似・インク抵抗の時間変化・撮影時の手ブレと考えられる。

4.2 速度の評価

次に、抵抗値の計算にかかる時間を、計測対象の面積を変えて測定した。図8左は計測に用いた画像であり、パターンは、上から順に5×150mm²の1, 2, 5, 10, 20倍となっている。これらのパターンの抵抗値を計測した際の、ピクセル数と計測にかかった時間との関係を図8右に示す。通常O(n³)の時間計算量が必要な逆行列の計算時間が、スパース性を利用した結果O(n²)の時間計算量を持つ行列の作製よりも低く抑えられていることが分かる。

計算時間の実用における限界を10秒と仮定した場合、

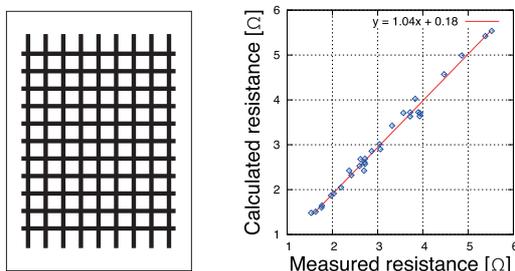


図7 左：計算精度の評価に用いたA4用紙の回路パターン。右：計算された抵抗値に対する実際の抵抗値 [5]

Fig. 7 left: The A4 sized printed pattern to evaluate accuracy of the proposed method. right: Calculated resistance against true values measured (right) [5].

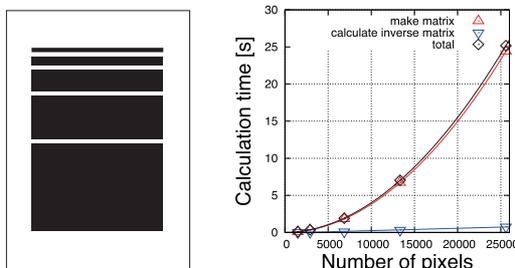


図8 左：計算時間の評価に用いたA4用紙の回路パターン。右：回路パターンのピクセル数に対する計算時間 [5]

Fig. 8 left: The A4 sized printed pattern to evaluate speed of the proposed method. right: The calculation speed against the number of pixels (right) [5].

図8右より合計時間が10秒以下となるのは図8左の上から4つ目までのパターンである。つまり、導電性インクの面積が紙の面積の約10分の1以下であれば十分短時間で計算を行うことができる。これは図2aのような、ワークショップでよく見られる回路であれば十分現実的な制約条件である。一方で図2cのように回路自体をデザインの主要な要素とする芸術的回路の場合、計算時間が長くなることが考えられる。

5. アプリケーション

前章で解説したアルゴリズムは単純だが大きな仕様変更をしなくても様々な回路の問題に応用できる。この章ではConductARの有効性を検証するために、基本のアルゴリズムを発展させて、(1)芸術的な回路における過電流の検知、(2)ヒータの試作における電熱の推定、(3)ワークショップにおける複数個・複数種類のLEDの点灯、という3つのアプリケーションを紹介する。1章でも述べたが、回路パターンにおいて生じる過剰な電流や熱やLEDの不均一な明るさは、導電性インク回路の作製において頻発する固有の問題である。なお、(1)、(2)はPDFデータを入力として用いたが、実物の写真を利用することも可能である。手描きと印刷との差異は6.1節で述べる。

5.1 芸術への応用：過電流の検知機能

図9(a)は、パソコンを用いてデザインされた導電性インク向けの回路パターンである(黒の部分が銀ナノインクで印刷または手描きされる)。このように非常に芸術性の高い回路パターンを実装する場合、過電流によるマイグ

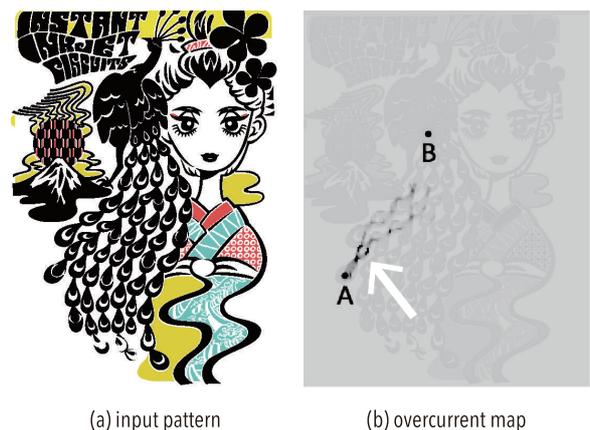


図9 芸術的回路における過電流の可視化。a：入力した画像。PDFをラスタライズしたデータを入力している。b：点AB間に電源を接続すると仮定し、ConductARにより可視化した電流値。グレースケールの濃い部分により大きな電流が流れることを示している(文献[22]より改変)

Fig. 9 Visualization of overcurrent in aesthetic circuit. a: input image is rasterized from the PDF original datum. b: an overcurrent map shows more black region has more current density (modified from Ref. [22]).

レーションや焼け焦げが発生し、長期間の使用が不可能となる場合がある。そこで芸術用途での応用例として、複雑な回路パターンを含むアート作品において過電流の起こる箇所を検出する機能を実装した。前章で解説したアルゴリズムを用いることで、抵抗値の計算の際に各ピクセルにおける電流も分かるため、入力された画像の電流値を可視化することができる。図 9 (b) は、図中の点 A・B 間に電流源を接続したと仮定した場合のシミュレーション結果であり、グレースケールの濃い部分においてより大きな電流が流れることを示している。ここから、点 A 近傍の線幅が細くなっている箇所において、過電流が流れて回路が故障する可能性が高いということが分かる。使用者はこの結果をもとにデザインを修正することができる。

なお、図 9 では入力画像として PDF をラスタライズしたデータを利用した。しかし、前述したとおり写真を入力として使用することも可能である。

また、図 9 における過電流の可視化では、電流値として相対値を使用している。そのため、実際に回路が破損するかどうかは電池の大きさや種類に依存することとなる。しかし、アルゴリズムに使用する値を実際の電池に合わせることで絶対値での表示も可能である。

5.2 試作への応用：ヒータの設計

導電性インク回路を用いると、産業向け製品からものづくりにおける気軽な試作まで、様々な形状・温度のヒータを簡単に作製することが可能である。しかし実際にヒータを作製すると、不均一な熱分布から回路が故障するという問題が頻発する。また、ヒータを目的としていなくても、回路の予期せぬ電熱が紙の回路の故障につながることは多い。そこで試作用途での応用例として、銀ナノインク回路をヒータとして利用する際に電熱分布を推定する機能を実装した。まず、図 10 (a) に示すように、AgIC 株式会社 [9] が実用化している銀ナノインク回路のヒータに倣った蛇行型のヒータのパターンを作製した。これに本アプリケーションを適用した結果が図 10 (b) であり、赤で示される領域に電流が集中することを示している。(1) のデザインの場合、急峻に蛇行するパターンの角において電流が集中して流れる一方、(2) のデザインでは電熱が比較的一定であり、均一かつ安定動作のヒータが作製できることが予想される。また、図 10 (c) は実際に作製したヒータを安定化電源と FLIR 社のサーモカメラで実測したものであり、シミュレーションによる発熱量分布の評価が正しいことが分かる。

このアプリケーションにおいても入力画像は PDF データとした。また、電熱は相対値として表示したが、電源の特性を決めることによって絶対的な熱量を計算することが可能である。

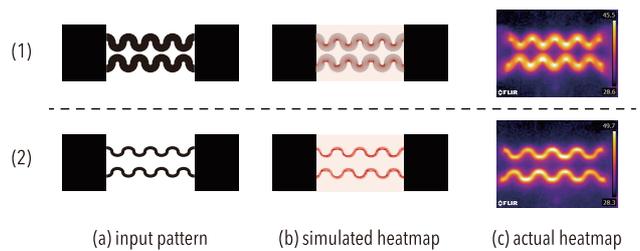


図 10 ヒータの試作に向けた応用。(1), (2) はそれぞれ別のデザインを示している。a: 入力した蛇行型のヒータ。b: ConductAR により可視化した電熱。c: 安定化電源と FLIR 社のサーモカメラで実測したヒートマップ。(1) のヒータは蛇行の内側に電熱が集中しており回路の損傷や不均一な加熱につながる。(2) のヒータでは均一かつ安定して動作することが分かる (文献 [22] を改変)

Fig. 10 An application for heater design. (1), (2) individually show different design. a: Meandering heaters used as input data. b: Heat generated from each heater is visualized as red pixels. c: Actual heatmaps obtained from FLIR thermo camera. The heater (1) shows uneven and fragile heating, while (2) shows relatively constant and safe behavior (modified from Ref. [22]).

5.3 教育への応用：複数個・複数種類の LED の点灯

教育への応用として、ワークショップにおいて、複数個・複数種類の LED を均等な明るさで点灯させるような線幅を自動的に提案する機能を実装した。複数の LED が均等に点灯しないという問題は、我々が導電性インクでワークショップを行う際に最もよく目にする問題である。複数の LED を 1 つの回路で均等な明るさに点灯するのは、以下の理由から想像よりも難しい場合が多い：(1) LED のしきい値電圧は、色と種類ごとに異なる、(2) LED の明るさはしきい値電圧と流れる電流量に依存する。

5.3.1 LED のモデル化

問題を単純化するために、いくつかの制約条件を課した。まず、LED は素子の種類によってパラメータが異なるため、この実験では使用する LED を赤色 (LTST-C150CKT)、緑色 (LTST-C150KGKT)、青色 (LTST-C150TBKT) に限定した。また、LED は線形素子ではないので、現在のアルゴリズムに実装するために、以下の近似を行った。

(1) LED はしきい値電圧を印加すると電圧源になる。

(2) LED の輝度は電流に比例する。

この根拠は以下のとおりである。図 11, 図 12 は、上記の 3 種類の LED のデータシートから抜粋・整理したデータである。図 11 は LED の電流-電圧特性を示しており、これを見ると、電圧がしきい値電圧より小さい場合には電流がほとんど流れない一方で、しきい値電圧を超えると急激に電流が上昇する様子が見える。このことから、(1) の近似を採用した。また、図 12 は LED の輝度-電流特性を示している。とりわけ電流が 30 mA より小さい領域では、輝度が電流にほぼ比例している。このことから (2) の近似

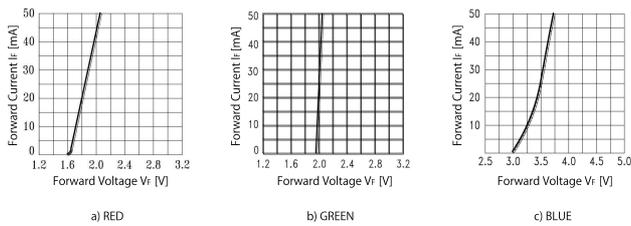


図 11 使用した LED の電流–電圧特性 [5]

Fig. 11 Current-voltage property of the supported LEDs [5].

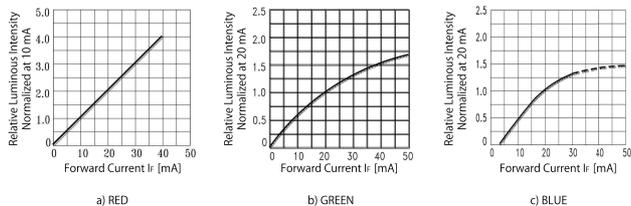


図 12 使用した LED の輝度–電圧特性 [5]

Fig. 12 Brightness-current property of the supported LEDs [5].

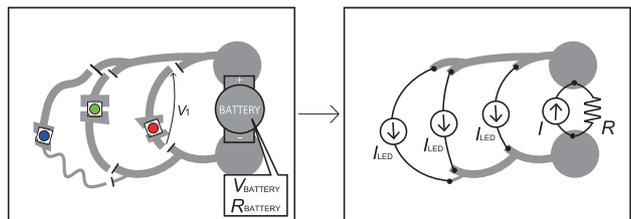


図 13 個々の LED に同量の電流を流すための変換. LED と電池を電流源に等価変換することによって, 抵抗値計算のアルゴリズムを応用することができる [5]

Fig. 13 Applying the same current to all LEDs. The battery is modelled as a current source in order to use the basic algorithm of calculating the resistance by the nodal equation [5].

を採用し, LED の輝度がそろう条件として, 「それぞれの LED に流れる電流が等しくなる」を仮定することにした.

5.3.2 LED を均等に点灯するためのアルゴリズム

前項の近似より, 解くべき問題は「すべての LED にしきい値よりも大きな電圧がかかっており, かつ等しい電流が流れているようにする」に簡単化された. そこでまず, すべての LED に流す電流を決定する. 図 13 に示すように, 各 LED に流れることになる電流を I_{LED} と仮定すると, LED を含む枝は大きさ I_{LED} の電流源に変換することができる. 次に, 1つ分の電池の電圧を $V_{BATTERY}$, 内部抵抗を $R_{BATTERY}$ とすると, ノートンの定理より電池を電流源に等化変換することができて, その電流源の電流と内部抵抗はそれぞれ

$$\begin{cases} I = V_{BATTERY}/R_{BATTERY} \\ R = R_{BATTERY} \end{cases}$$

となる. この準備をすると, 3章に示した方法と同様にし

て, 各点における電圧と抵抗値を求められる.

そこで図 13 左の回路に戻って考えると, 1つの LED を含む枝の両端にかかる電圧を求められる. たとえば赤色 LED の枝にかかる電圧を V_1 とすると, この LED が光るためには, 赤色 LED のしきい値電圧 $V_{THRESHOLD-R}$ に関して

$$V_1 \geq V_{THRESHOLD-R}$$

を満たさなければならない. そうでなければ, I_{LED} の設定値が大きすぎるか $V_{BATTERY}$ が小さすぎるかということになるので, それらを変更してもう一度節点方程式を解く. なお, 実装では電流値を小さくなる方向に段階的に変化させて対応した. 一方, この式を満たしているならば, 着目している枝の導電性インク線路が持つべき抵抗値

$$R_1 = \frac{V_1 - V_{THRESHOLD-R}}{I_{LED}}$$

が求められる. この値から, 枝の線路の太さを適宜変更してやれば, 赤色 LED に流れる電流を I_{LED} に調整できる. 他の LED を含む枝に関しても同様に解けばよい.

なお, ある枝の抵抗値が現在どの程度かは 3章の方法で求められるので, そこから現在の抵抗値と理想的な抵抗値との比が求められる. その比に応じて, ペンや消しゴムを用いて枝の太さを変化させれば, 線幅の調整が可能となる. 図 1 は, ConductAR 使用者が実際に導電性インクペンと導電性インクの消しゴムを利用して回路の線幅を変更する様子を示している. 使用後にすべての LED をほぼ均等に点灯できることが分かる.

5.3.3 LED 均等点灯の考察

図 14 は, ConductAR を使用し, 線幅を調整して複数の LED の輝度を等しくするプロセスを示している. 使用者はまず, ConductAR 上のインタフェースを使用して, 各 LED とバッテリーを配置する. 次に, 回路上のどの枝に LED が載っているかを示す. 最後に, ConductAR は各部の太さをどれくらい変更する必要があるかを示すテキストフィードバックを表示する. このアルゴリズムの利点として, デザインを変更したくない部分を修正の対象から外すことが可能である.

図 15 の写真は, ConductAR を使用する前後の回路を示している. この実験では, A6 サイズの紙を使用した. 左の印刷された導電性インク回路に ConductAR を適用し, 得られた線幅の比に従って再び右のような回路を印刷した. 手描きの代わりに印刷された導電性インクパターンを使用したのは, 手描きによって生じうる誤差を回避するためである. 使用する電源に関しては, ボタン電池 1つ分の 3.0V の電圧では青色 LED のしきい値電圧 $V_{THRESHOLD-B} = 3.4V$ を点灯させるには不十分であるため, $V_{BATTERY}$ を 6V, $R_{BATTERY}$ を 6Ω に設定して, ボタン電池 CR-2032 2個分をモデル化した.

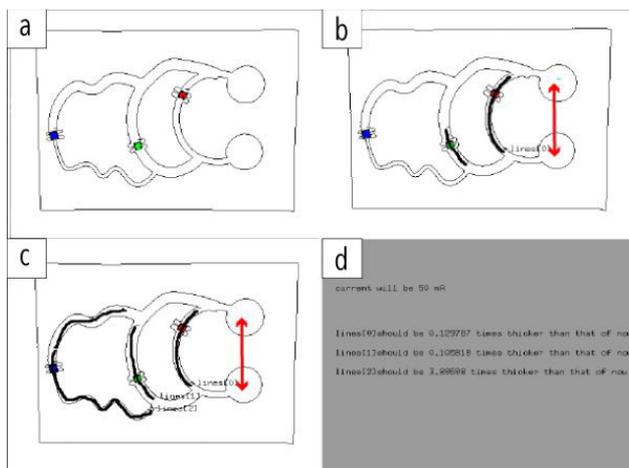
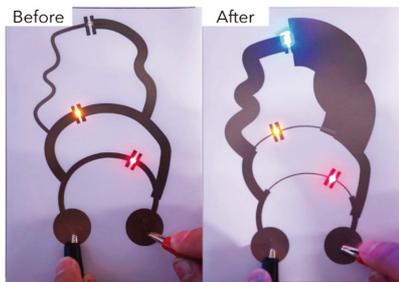


図 14 LED が均等に光るように手描きの回路の線幅を調整する手順。 a：図 6 に示した方法で回路パターンを認識し，GUI 上で LED を配置する。 b：電池の位置をドラッグで指定する。 c：修正したい LED のある枝を指定する。 d：テキストによるフィードバックを行い，線幅をどの程度太く/細くすればよいかを提示する [5]

Fig. 14 How to adjust trace widths in a hand-drawn circuit to equalize the brightness of LEDs. a: Capturing the image as shown in Fig. 6, the user indicates the position and colour of the LEDs on GUI. b: The user then drags a red arrow to indicate the position of the battery. c: Individual traces which the user is happy to modify are identified. d: ConductAR provides text-based feedback indicating how much thicker or thinner each trace should be [5].



	Before		After	
	Voltage	Current	Voltage	Current
Red	2.11 V	73.59 mA	1.95 V	35.68 mA
Green	2.05 V	117.8 mA	2.14 V	42.21 mA
Blue	2.36 V	1.402 μA	3.32 V	27.14 mA

図 15 線幅変更を適用する前後の画像と回路パラメータ。適用前：青色の LED にしきい値電圧が印加されていないため，電流がほとんど流れず発光もしない。適用後：青色の LED にしきい値電圧が印加され，すべての LED に等しいオーダの電流が流れている [5]

Fig. 15 The photographs and table of the circuit before and after applying the function. Before: the blue LED is not lit, since the voltage and current is too low. After: the blue LED is lit and the current goes through each branch on the same order [5].

図 15 下に，修正前後における各 LED の電圧と電流の比較を示した。まず修正前に関して見ると，確かに青色 LED に印加された電圧がしきい値電圧 $V_{THRESHOLD-B}$ を下回っており，電流がほぼ流れていないことが分かる。一方修正後では，すべての LED にしきい値以上の電圧が印加されている。また，赤・緑・青それぞれの電流値は修正前に比較してその差が小さくなっており，目標としていた 50 mA に近づいている。

最後に，実際にワークショップを行った際に LED が点灯できない場合の原因を以下に分類する。また，その際の ConductAR による対処法を示す。

1. LED を含む枝の抵抗値が高い。

ConductAR の指示によって枝が太くなるように指示する。

2. 電源電圧が低い。

ConductAR の計算の結果，枝の太さの変更で対処できない場合（LED のしきい値電圧が印加されていない場合など）には電源電圧を上げるよう表示する

3. 回路の中に短絡と見なせるような部分がある。

見かけ上短絡した線があっても枝の太さの変更で対処できる場合は 1 のとおりに指示を出す（導電性インクの場合，見かけ上短絡していても，シート抵抗値が高いので短絡しているパターンを変更せずに修正できる場合がある）。対処できない場合には 2 のとおりに電源電圧を変えるか，抵抗値推定の結果抵抗値が低くなっている部分を切る。

6. 現実的な条件における有効性

6.1 手描きの回路に対する有効性

前章までの実験では，実験精度の向上のために PDF データや印刷された回路を使用した。そこで本章では，ConductAR の手描きと印刷の両方の回路に対して有効であるかを検討する。手描きのパターンを使う場合には，前章で使用された印刷パターンと比較して，さらに 2 つの要因がシート抵抗値に影響する。

1 つ目の，そして最も重要な要因は，重ね塗りである。ワークショップなどの現実的な状況において使用者がペンでパターンを描く際には，隙間なくパターンを描くために同じ領域を複数回塗りつぶすことが一般的である。その結果，重ね塗りをした部分の導電パターンが厚くなり，シート抵抗は減少する。

2 つ目の要因は，ペンにかかる圧力の変化である。ペンにかかる圧力はパターンの描き方に依って変化する。その結果基板に塗布されるインク量とシート抵抗が変化する。

これらの要因が導電性インク回路のシート抵抗にどれだけ影響を与えるかを調べるために，導電性インクペンに精通した使用者と完全な回路の初心者の両方を含むユーザ（20 歳から 27 歳， $n = 30$ ）に対して調査を行った。図 16

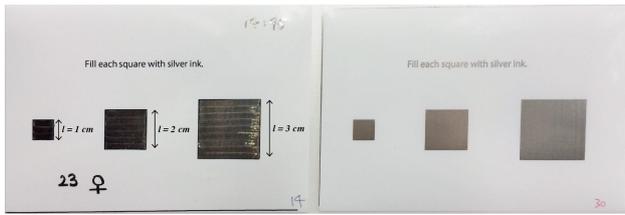


図 16 左：手描きの回路パターン。表面の凹凸が確認できる。右：同じサイズ・形状の印刷されたパターン [5]

Fig. 16 A hand-drawn sample (left) and the equivalent printed pattern (right). The uneven surface of the hand-drawn pattern is clearly noticeable when compared with the smooth surface of the printed pattern [5].

左に示すように、ユーザには、導電性インクペンを用いてサイズ 1 cm × 1 cm, 2 cm × 2 cm, および 3 cm × 3 cm の長方形を記入するよう依頼した。また、対照実験として、同じサイズの印刷パターン (n = 4) を印刷した (図 16 右参照)。その後、それぞれのパターンを 24 時間放置し、その後対角線の抵抗値を測定した。

表 2 は、手描きパターンと印刷パターンとの間の抵抗値を比較したものである。手描きのパターンははるかに大きな標準偏差を示している一方で、印刷パターンは、本稿で前説した 7% の誤差率と一致した結果である、4.6% から 7.1% の変動係数を示している。

この結果から、手描き回路の抵抗の計算では 10% のオーダーの誤差が発生し、プリント回路で計算したほど正確ではないことが分かる。しかし、絶対的な抵抗値ではなく相対的な抵抗比のみを必要とするアプリケーション (LED の均等点灯など) ではこの誤差が重大になることはない。図 1 を見ると、相対的なシート抵抗に関連した機能の場合には ConductAR が手描き回路にも適用可能であることが分かる。

また、同一のユーザがパターンを何度も描いた場合の個人内でのばらつきも評価した。表 3 は、図 16 の l = 2 cm の正方形を同一ユーザに 10 個書いてもらった場合のパターンの抵抗値の変動係数を示している (ユーザの人数は n = 10)。ここから、個人内での抵抗値のばらつきは、最もばらつきの大きいユーザで 28.8% であることが分かった。つまり、あるユーザが同じパターンを描いて認識を行ったとしても、その計算値には約 3 割の誤差が発生しうることには注意が必要である。

6.2 複数の導電性インクに対する有効性

次に、ConductAR が複数の導電性インクに対しても有効であるかを検証する。

まず原理的な根拠を考える。本稿で使用した AgIC 回路マーカーのようにインクが薄く伸びるペンであれば、同じ面積に塗布されたインクのシート抵抗はある程度一定となる。なお、手描きによるシート抵抗のぶれについては 6.1 節に

表 2 手描き回路と印刷された回路におけるシート抵抗のばらつき [5]

Table 2 Variation of sheet resistance between hand-drawn samples and printed samples [5].

長さ l [cm]	手描き			印刷		
	1	2	3	1	2	3
平均 μ [Ω /sq.]	1.74	2.07	2.44	1.85	2.14	2.33
標準偏差 σ [Ω /sq.]	0.66	0.57	0.73	0.13	0.11	0.11
変動係数 σ/μ	37.9%	27.5%	29.8%	7.09%	4.90%	4.62%

表 3 同一のユーザが 10 回繰り返して手描きした場合の抵抗のばらつき

Table 3 Variation of sheet resistance between ten-time trials by the identical user.

ユーザ	1	2	3	4	5
変動係数 σ/μ	11.7%	28.2%	28.8%	9.6%	12.4%
ユーザ	6	7	8	9	10
変動係数 σ/μ	13.2%	9.2%	14.6%	13.7%	19.1%

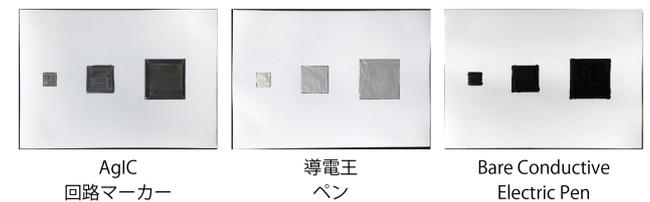


図 17 複数の導電性インクペンパターン。1 辺 1, 2, 3 cm の正方形をペンで塗った

Fig. 17 Patterns of conductive inks. Each square has a side of 1, 2, and 3 cm respectively.

表 4 複数の導電性インクペンのシート抵抗, ConductAR で使用したコンダクタンス, それぞれの正方形パターンにおける計算値と実測値との誤差

Table 4 Comparison of conductive ink pens which shows sheet resistance, conductance used in ConductAR, and error between calculated and measured values in each square.

	シート抵抗 [Ω /sq.]	使用した g [S]	計測値と実測値との誤差		
			l = 1	l = 2	l = 3
AgIC 回路マーカー [9]	2.43	1.4	2.06%	2.84%	1.18%
導電性ペン	0.64	5.7	3.13%	11.1%	10.3%
BarePaint [7]	54.5	0.06	5.87%	3.62%	2.04%

おいてすでに考察した。一方、実装されたアルゴリズムにおいてシート抵抗を表すパラメータが単位コンダクタンス g である。表 1 にも示したとおり g は定数になるので、インクごとに異なる g を選択すれば複数の導電性インクに対応できることになる。

そこで、実際に複数の導電性インクを用いて抵抗値の推定を行った。図 17 に使用したパターンとインクの種類、表 4 に使用したインクのシート抵抗と単位コンダクタンス g の値、計測したシート抵抗値の誤差を示す。なお、抵抗

値の測定パターンは図 16 と同様のパターンのものである。計算値の誤差より、コンダクタンスを変更した場合に 3 種類のペンすべてで計算誤差が 10%程度までに抑えられることが分かった。以上から、本手法が複数の導電性インクに対して有効であることが実験的に確認できた。なお、導電性ペンと BarePaint で計算誤差が大きくなった原因は、AgIC ペンよりも厚みのあるインクであることが考えられる。また、使用したコンダクタンスは実験的に決めたものであり、実際に新種のインクを使用する場合にはなんらかのキャリブレーションが必要になる。

7. 実際の回路への適用と制約条件

本章ではユーザに求められる制約について議論する。

7.1 ユーザの作製した回路の認識

まず、本手法がユーザによって作製された回路においても有効であるかを検証するため、ユーザに回路を作製してもらい認識を行った。その際、事前に導電性インクペンの使用方法を習得させた $n = 6$ のユーザに対して、以下の 2 つの条件で回路を作製させた：(1) LED を 1 つ以上点灯させること、(2) 必ず色ペンで装飾を施すこと。その後、回路から LED と電池を除き、ConductAR で回路を認識して抵抗値を検出した。図 18 に作製された回路を示す。これらの画像認識の結果、図 18E を除くすべての回路において 0.19 秒 (C) から 14.9 秒 (B) の計算時間で抵抗値計算を行うことができた (E に関しては次節で後述する)。またその際の抵抗値の精度は 7.8% (D) から 40.5% (F) であった。F の画像において特に大きく誤差が生じた理由として、6.1 節で論じたペンの筆圧の違いが考えられる。

ここから、一部認識できない例も存在するものの、総じて実際に作製された回路においても画像認識と抵抗値推定

が可能であることが明らかとなった。5 章で論じたアプリケーションについては、すべて抵抗値推定が可能であれば発展的に実行できるアルゴリズムであることから同様に実行可能であると思われる。

7.2 使用時の制約

本節ではユーザが作製した回路を認識した結果得られた現状における ConductAR の制約条件について述べる。

7.2.1 色の付いたペンによる装飾

図 2 でも示したように、導電性インクペンを用いる多くのユーザは色の付いたペンを用いて回路を装飾する。そのため、ConductAR は図 1 のように通常のペンによる装飾が紙の上に描かれていても計算を行えるように実装されている。ConductAR では、図 6・図 14 のとおりいかなる機能を使用する際でもユーザが画面上の回路パターンをマウスポインタまたは指で指定することになる。仮に装飾があったとしてもその部分を回路と見なさなければ問題ない。

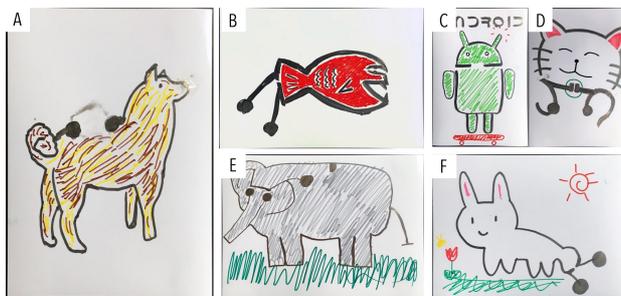


図 18 ユーザスタディによって描かれた回路 ($n = 6$)。ユーザには (1) LED を 1 つ以上点灯させる、(2) 必ず色ペンで装飾を施すことを依頼した

Fig. 18 Conductive ink Circuit drawn by users ($n = 6$). Users are asked to (1) make at least 1 LED lit up and (2) decorate their circuit with colored pens.

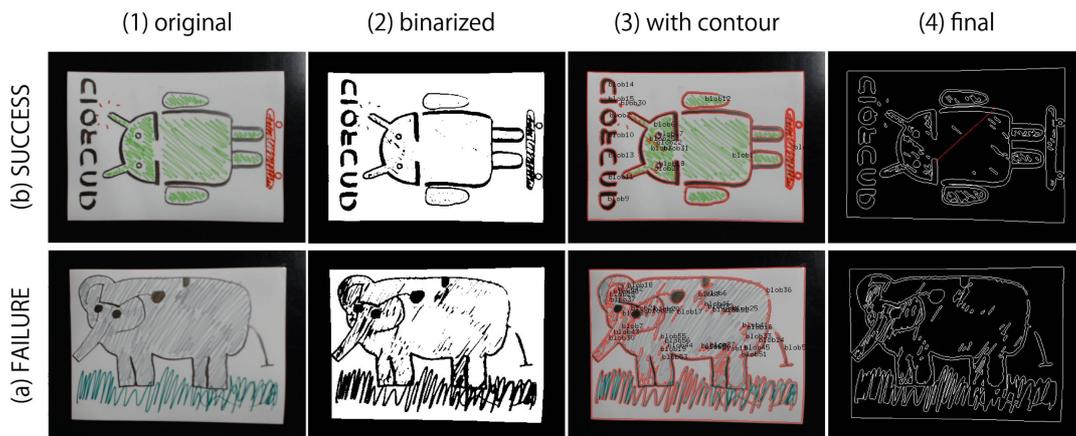


図 19 色ペンの影響。(a) ConductAR で認識に失敗した例と (b) 成功した例。色ペンが回路に重なっていると、(2) 二値化の際に回路と装飾とを分離できない

Fig. 19 Effect of color pens on ConductAR. Examples which (a) succeeded in and (b) failed in recognizing circuit. When the trace of color pen is over the trace of conductive ink, it is hard to distinguish each of them.

ただし、装飾が導電性インクのパターンと接触している場合、ConductAR は正しい認識を行うことができない。たとえば図 19 に回路の認識をできなかった例を示す。図 19(a) はゾウの絵の縁が導電性インクで描かれており、その内側や足の周辺が色ペンで塗りつぶされている。この回路を認識すると、回路の部分と色ペンの部分が触れている領域が多いため、図 19(a2) に示すように、二値化しても回路と装飾が分離できていない。このようなパターンは現状のアルゴリズムで解析不可能である。今後この問題に対処する場合には、色相を用いたインクパターンの識別などが考えられる。

7.2.2 均一な光源

画像を撮影する際には、使用した紙と導電性インクの光沢による反射を軽減するために、均一な光源を使用する必要がある。たとえば蛍光灯の真下や直射日光下ではインクが明るく反射して、実際の回路パターンを認識できない場合がある。

7.2.3 撮影の技術

図 6 に示すように、本稿の実装ではユーザは導電性インク回路の描かれた紙を真正面から一定の距離で（赤で縁取られた枠に合わせて）撮影する必要がある。しかし子どものような一部のユーザにはこのような撮影が難しい場合があると考えられる。この問題に対処するためには、画像から取得された紙の概形を矩形補正して導電性インクの専用紙と同じ比率を持つ長方形に変換する方法が有効であると思われる。これによって、撮影した画像に紙が写っていればつねにほぼ同様の精度で計算ができるようになると思われる。

8. まとめと展望

本稿では、導電性インク回路のパラメータを認識・解析・可視化するツールである ConductAR を提案し、その実装方法と評価を述べた。また、芸術・試作・教育におけるアプリケーションを示し、手描き回路などの現実的な条件で生じる誤差や問題を検証した。

さらに、このツールは以下のような 7 つの目標を達成した。

1. 任意の 2 次元的な導電性インクパターン形状を解析できる。
2. PC とタブレットという、多くの人に使用可能な普及したデバイスのみを用いて解析できる。
3. 描き（直し）-テスト-解析という試行錯誤のサイクルに対応すること。
4. アプリケーションの章で示したとおり、多数の問題に対応できるような拡張性のあるアルゴリズムである。
5. 複数の導電性インクに対してシート抵抗のパラメータを変更するだけで同様のアルゴリズムを適用できる。
6. シート抵抗の見積りは、最小限の労力で行うことができる。ただし UI には後述する改善の余地が存在する。

7. マルチメータなど従来の計測機器を使わなくても 7% 以下 ($p \leq 0.05$) の精度で解析が行える。ただし手描き回路の場合には個人間での差異・個人内での差異を 3 割程度考慮する必要がある。

以上から、ConductAR を用いることによって、回路の誤りを発見・修正するための知識と道具を持たない初心者でも導電性インク回路を使って試行錯誤の設計を行うことができるようになると考えられる。今後、子どもや芸術家、ものづくり愛好家などあらゆる人々が様々な回路を簡単に作製できるようになることを期待する。

今後考えられる ConductAR の発展にはには 2 つの方向性が考えられる。

1 つ目の方向性は、本稿で紹介した基本的な抵抗推定アルゴリズムに基づく他のアプリケーションの実装である。本稿では導電性インク特有の問題に注力したものの、ユーザとして回路初心者を想定していることから、たとえば、短絡を検出して可視化する機能は有用であると予想される（開放検知は回路の輪郭を認識しているため実装済みである）。

2 つ目の方向性は、フィードバックの提供など、UI の改善である。本稿における実装では、抵抗の推定と修正のための指示は単にテキストとして表示される。しかし、使用者にとって視覚的なフィードバックより直感的であるといえる。たとえば、計算された電流がその大きさに応じて画面状の回路を流れるようなインタフェースが考えられる。また、回路を認識した時点で、それをデジタルデータとして記録し、必要に応じてプリンタで素早く複製できるようにする機能は非常に有用だと思われる。

謝辞 3 点の作品を提供してくれた Myamo, 有用な提案とコメントをしてくれた皆様に謝辞を申し上げる。本研究は JST ERATO 川原万有情報網プロジェクト (JPMJER1501) の一環として実施されました。

参考文献

- [1] 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, *Proc. 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, pp.363–372 (2013).
- [2] Kawahara, Y., Hodges, S., Gong, N.-W., Olberding, S. and Steimle, J.: Building functional prototypes using conductive inkjet printing, *IEEE Pervasive Computing*, Vol.13, No.3, pp.30–38 (2014).
- [3] Qi, J. and Buechley, L.: Sketching in circuits: Designing and building electronics on paper, *Proc. 32nd annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1713–1722 (2014).
- [4] 三菱製紙株式会社：銀ナノ—銀ナノ粒子インク—三菱製紙株式会社，入手先 (<http://www.mpm.co.jp/electronic/gin-nano/index.html>) (参照 2016-11-15)。
- [5] Narumi, K., Hodges, S. and Kawahara, Y.: ConductAR:

An augmented reality based tool for iterative design of conductive ink circuits, *Proc. 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, pp.791–800, ACM (2015).

[6] Hodges, S., Villar, N., Chen, N., Chugh, T., Qi, J., Nowacka, D. and Kawahara, Y.: Circuit stickers: Peel-and-stick construction of interactive electronic prototypes, *Proc. 32nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1743–1746 (2014).

[7] Bare Conductive: Creative electronic tools–Bare Conductive, available from (<https://www.bareconductive.com>) (accessed 2016-11-15).

[8] Circuit Scribe: Circuit Scribe–Draw Your Own Circuits With Our Conductive Ink Pens, available from (<https://www.circuitscribe.com/>) (accessed 2016-11-15).

[9] AgIC Inc.: Electronics, Everywhere, available from (<http://agic.cc/>) (accessed 2016-11-15).

[10] Olberding, S., Gong, N.-W., Tiab, J., Paradiso, J.A. and Steimle, J.: A cuttable multi-touch sensor, *Proc. 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.245–254, ACM (2013).

[11] Kato, K. and Miyashita, H.: ExtensionSticker: A Proposal for a Striped Pattern Sticker to Extend Touch Interfaces and its Assessment, *Proc. 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1851–1854, ACM (2015).

[12] Karagozler, M.E., Poupyrev, I., Fedder, G.K. and Suzuki, Y.: Paper generators: Harvesting energy from touching, rubbing and sliding, *Proc. 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.23–30, ACM (2013).

[13] Li, H., Brockmeyer, E., Carter, E.J., Fromm, J., Hudson, S.E., Patel, S.N. and Sample, A.: PaperID: A Technique for Drawing Functional Battery-Free Wireless Interfaces on Paper, *Proc. 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.5885–5896, ACM (2016).

[14] Conductak: Stick Circuits Anywhere, available from (<http://conductak.com/>) (accessed 2016-11-15).

[15] Ramakers, R., Todi, K. and Luyten, K.: PaperPulse: An integrated approach for embedding electronics in paper designs, *Proc. 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.2457–2466, ACM (2015).

[16] Lo, J., Torres, C., Yang, I., O’Leary, J., Kaufman, D., Li, W., Dontcheva, M. and Paulos, E.: Aesthetic Electronics: Designing, Sketching, and Fabricating Circuits through Digital Exploration, *Proc. 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.665–676, ACM (2016).

[17] AgIC Inc.: Erasable Circuit Marker: Draw and Edit Circuits Smoothly (accessed 2016-11-15).

[18] Narumi, K., Shi, X., Hodges, S., Kawahara, Y., Shimizu, S. and Asami, T.: Circuit Eraser: A Tool for Iterative Design with Conductive Ink, *Proc. 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp.2307–2312, ACM (2015).

[19] Wang, C., Yeh, H.-M., Wang, B., Wu, T.-Y., Tsai, H.-R., Liang, R.-H., Hung, Y.-P. and Chen, M.Y.: CircuitStack: Supporting Rapid Prototyping and Evolution of Electronic Circuits, *Proc. 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.687–695, ACM (2016).

[20] Zoran, A. and Paradiso, J.A.: FreeD: A freehand digital sculpting tool, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.2613–2616 (2013).

[21] Noris, G., Hornung, A., Sumner, R.W., Simmons, M. and Gross, M.: Topology-driven vectorization of clean line drawings, *ACM Trans. Graphics (TOG)*, Vol.32, No.1, p.4 (2013).

[22] 中原健一, 鳴海紘也, 川原圭博, 浅見 徹: B-18-5 銀ナノインク回路の過電流からの防護に向けた発熱量分布の可視化, 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, Vol.2016, No.2, p.369 (2016).

付 録

A.1 ConductAR で使用されたパラメータ

表 A-1 に, ConductAR に使用したパラメータを示す.

表 A-1 プログラムの各種パラメータ [5]
Table A-1 The parameters used in this paper [5].

カメラ画像横幅	480 pixel
カメラ画像縦幅	360 pixel
電池 1 個分の電圧 V_{BATTERY}	3.0 V
電池 1 個分の内部抵抗 R_{BATTERY}	3.0 Ω
赤色 LED しきい値 $V_{\text{THRESHOLD-R}}$	1.5 V
緑色 LED しきい値 $V_{\text{THRESHOLD-G}}$	1.7 V
赤色 LED しきい値 $V_{\text{THRESHOLD-B}}$	3.4 V



鳴海 紘也 (学生会員)

1991 年生. 2015 年東京大学工学部電子情報工学科卒業. 2017 年より日本学術振興会特別研究員 (DC1). ACM, 電子情報通信学会, 応用物理学会, 日本ロボット学会各会員.



中原 健一 (学生会員)

1994 年生. IEEE, 電子情報通信学会各会員.



川原 圭博 (正会員)

1977 年生. 2005 年東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了. 情報理工学博士. 2005 年同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. 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. AgIC 株式会社および株式会社 SenSprout 技術アドバイザー. 2015 年より JST Erato 研究総括. IEEE, ACM 各会員.