

ユニバーサル基板の配線画像解析による回路図復元 Schematic Reconstruction from Wiring-Side Images of Universal Circuit Boards

林 哲矢¹⁾ 田中 剛¹⁾ 遠藤 雅樹¹⁾ 寺田 憲司¹⁾ 大野 成義¹⁾
Tetsuya Hayashi Tsuyoshi Tanaka Masaki Endo Kenji Terada Shigeyoshi Ohno

1 序論

近年、電子機器に搭載される電子回路の設計および製造には、プリント配線板 (Printed Wiring Board: PWB) が用いられている。一方、電子機器組立技能訓練などの工学教育の現場では、PWB に加えてユニバーサル基板を用いた手作業による回路試作実習が行われている。これは、ユニバーサル基板は柔軟な配線や部品配置が可能であり、電子機器組立で求められる様々な基本技能を学ぶための教材として優れているためである。

多くの回路試作実習では、学生は回路設計から実装・評価に至る一連のプロセスを体系的に学習することが可能である。回路設計および製作においては、厳密なルールが設けられておらず、教員が提示する回路図 (以下、理想回路図) と機能的に等価であれば、配線経路や部品配置に個人差があっても問題とされない。しかし、手作業で製作された回路基板には、断線や短絡、誤配線などの動作不良が頻発し、その原因の特定は学生個人では困難であることが多い。そのため、多くの試作基板に対して教員が個別に対応せざるを得ず、人的負担の増加や学生の待機時間の増大、さらには教育効率の低下といった問題が生じている¹⁻⁵。

この問題に対し林ら⁵は、教員の個別対応の並列化を目的とした自動化システムを提案している。このシステムは、ユニバーサル基板上に製作された試作基板 (以下、試作実習基板) の画像から部品および配線を抽出し、接続関係を再構築することでその基板の回路図を自動で復元、さらに、復元された回路図を理想回路図と比較することで、動作不良の有無およびその原因の推定を目指したものである。しかし、林らの研究は自動化システムの機能の検証までが研究対象であるため、この自動化システムの中核である部品面画像からの部品抽出機能と、配線面画像からの配線抽出機能および、それらの情報に基づく回路図の復元機能については実現されていない。

一方、部品抽出機能については、河野ら⁶や茂木ら⁷は、プリント回路基板 (Printed Circuit Board: PCB) の部品面画像より部品および端子位置の抽出機能を提案している。本研究で対象とするユニバーサル基板と PCB における部品面画像の違いは、貫通孔の数のみであり、部品の取り付け方法などに差異はなく本研究においても一定の精度が見込まれる。しかし、配線抽出機能や回路図の復元機能について報告された研究は見当たらなかった。

そこで、本研究では、試作実習基板の配線抽出機能の実現に焦点を当て、配線パターン抽出機能および抽出した結果と部品面の情報に基づいたグラフ構造として回路図を変換する回路図グラフ変換機能を提案する。これら2つの機能を総称して、回路図復元機能と呼び、実際の試作基板画像に適用しその有効性を検証する。

1) 職業能力開発総合大学校 The Polytechnic University of Japan

2 回路図復元機能の概要と課題

本研究における回路図復元機能の全体像を図1、回路図として抽出されるグラフ構造の一例を表1に示す。以下、このグラフ構造を回路図グラフと呼ぶ。回路図復元機能は、試作実習基板を対象に配線面画像から配線パターンを抽出し、得られた情報と部品面の情報に基づき回路図グラフを再構築する。回路図グラフは、部品およびその端子番号をノード、配線をエッジとしたグラフ構造で定義し、部品およびその端子ごとの接続関係によって回路全体の構造を再構築する。さらに、複数の配線が混在しても識別できるように、各エッジには配線属性 (図中 a~g) を付与する。

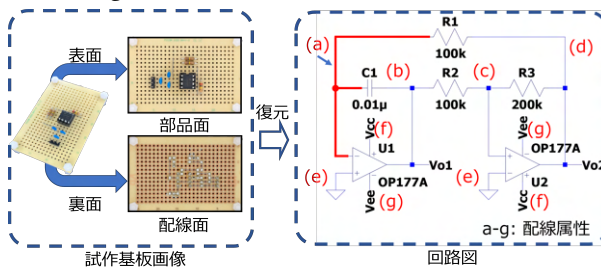


図1: 回路図復元の概要

表1: 回路図グラフの定義例

ノード	エッジ	ノード	エッジ	ノード	エッジ
R1・1	(a)	C1・1	(a)	U1・5	(b)
R1・2	(d)	C1・2	(b)	U2・1	(c)
R2・1	(b)	U1・1	(e)	U2・2	(e)
R2・2	(c)	U1・2	(a)	U2・3	(f)
R3・1	(c)	U1・3	(f)	U2・4	(g)
R3・2	(d)	U1・4	(g)	U2・5	(d)

回路図復元機能を実現において、林ら⁵が指摘しているユニバーサル基板の構造および手作業による製作に起因する視覚的課題と部品面および配線面からの抽出情報の結合における課題を表2に示す。本研究では、課題1~5に対しては配線パターン抽出機能を、課題6に対しては回路図グラフ変換機能を適用することで解決をする。これらの課題および対応方法については、第3節および第4節において、それぞれ対応する機能の中で説明する。

表2: 回路図復元機能を実現における課題

視覚的課題	
課題1	未使用孔による輝度のばらつき
課題2	フラックス残留物による輪郭の不明瞭化
課題3	撮影画像の回転・位置ずれに伴う座標検出誤差
課題4	スパーサーやシルク印刷部による配線の誤検出
抽出情報の結合における課題	
課題5	等間隔に形成された銅パターンの抽出
課題6	部品の端子と配線パターン間の接続関係の抽出

3 配線パターン抽出機能

本節では、第2節で挙げた課題に対応するための前処理および配線パターンを抽出する機能およびその評価指

標について述べる。本機能は、図 2 に示す 6 つの処理ステップから構成されており、画像撮影環境の工夫および画像処理を行った。画像処理ライブラリには OpenCV⁸ を用いた。第 3.1 項より各処理の詳細を述べる。なお、処理ステップのうち第 3.2 項～第 3.5 項に対応する画像処理結果を図 3 に示す。

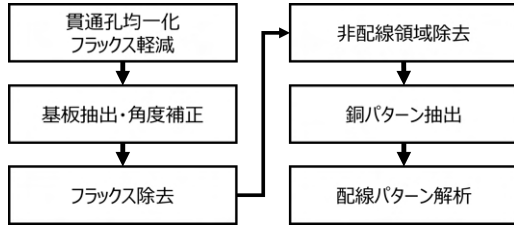
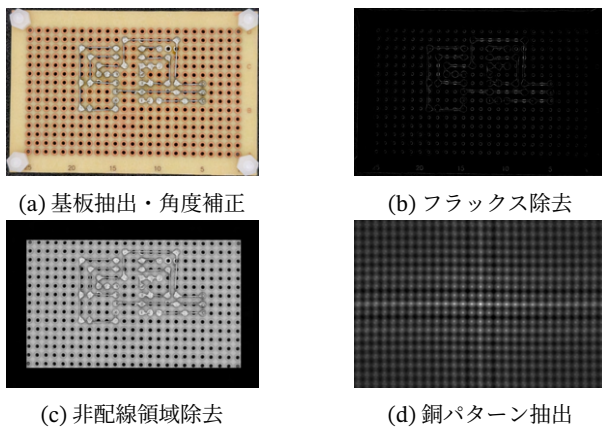


図 2: 配線パターン抽出の画像処理フロー



(a) 基板抽出・角度補正 (b) フラックス除去
(c) 非配線領域除去 (d) 銅パターン抽出

図 3: 画像処理による前処理結果例

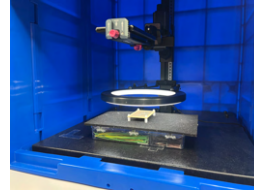
3.1 貫通孔均一化・フラックス軽減

本項では、課題 1「未使用孔による輝度のばらつき」および課題 2「フラックス残留物による輪郭の不明瞭化」に対する画像撮影環境について述べる。

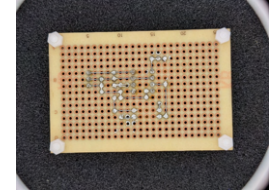
課題 1 は、ユニバーサル基板に形成された多くの貫通孔のうち、配線で使用されない貫通孔を通じて基板背面が映り込み、画像中に輝度の不均一が生じる課題である。これに対し、林ら⁵は、背景に黒色面を用いることで、すべての貫通孔を均一な暗部として表現する撮影方法を提案しており、本研究でもこの方法を採用した。

課題 2 に対しては、はんだに含まれるフラックスがはんだ付けされた箇所やその周辺に残留し、はんだ部や錫メッキ線、銅パターンの輪郭が不明瞭になることで、それらを誤検出することを解決しなければならない。この問題に対して、林ら⁵は、照明と基板との距離を短くし、光の反射角を浅く（すなわち鈍角）することで、これらの影響を軽減できると報告している。本研究では、この方針に従い、照明装置として株式会社アイテックシステム製のリングライト (TR200x152-16WD-4) とドームライト (TR202x40-100W-4) を用い、光の入射方向を調整することで輝度ムラの抑制を図った。

画像撮影環境および実際に撮影した試作実習基板の配線面画像を図 4 に示す。



(a) 画像撮影環境の外観



(b) 配線面の撮影画像例

図 4: 撮影環境と撮影画像例

3.2 基板抽出・角度補正

本項では、課題 3「撮影画像の回転・位置ずれに伴う座標検出誤差」に対する画像処理について述べる。課題 3 は、部品面と配線面の撮影画像において、撮影時のカメラ角度や位置ずれによって回路図グラフ変換時に両画像から得た情報の結合が困難となる点である。これに対し、本処理では画像の位置調整処理を行い、大まかな座標の補正を図った。

具体的には、まず、入力画像をグレースケール化した後、大津の二値化法⁹を用いて二値画像を生成する。続いて、外形検出および面積フィルタを用いて基板外形を抽出し、基板四隅の座標から傾きを得る。基板外形の抽出に際しては、輪郭強調処理を行うとリングライトの照明による影が輪郭として検出される問題があったため、本処理では輪郭強調を行わず、二値画像をそのまま用いた。得られた傾きに基づいて回転角度を算出し、画像全体をアフィン変換して基板外形が水平になるよう補正を行う。その後、再度基板外形を抽出し、基板全体が収まるように切り出す。これらの処理を部品面画像および配線面画像の両方に適用することで、撮影時に生じた角度や位置のずれを補正し、大まかな座標の整合性を確保する。配線面画像に対する適用結果の例を図 3a に示す。

3.3 フラックス除去

本項は、課題 2「フラックス残留物による輪郭の不明瞭化」に対して、第 3.1 項で述べた撮影環境の工夫に続く、フラックス残留物に起因する輝度ムラを除去する画像処理について述べる。本処理では、林ら⁵の報告に基づき、構造的特徴の差異から配線部分を選択的に強調することでフラックスによる不明瞭領域を抑制し、配線パターンの視認性の向上を図った。

構造的特徴について、フラックス残留物は、錫メッキ線による配線パターンと異なり連続的な管状構造を持たない。林ら⁵は、この差異に着目し、医療分野の血管抽出処理で用いられている Frangi フィルタ¹⁰を応用し、管状構造の強調によってフラックス領域の抑制を図っている。Frangi フィルタとは、画像のヘッセ行列 (Hessian matrix) に基づいて各画素周辺の局所構造を解析し、細く連続した構造構造を強調するフィルタ処理である。Frangi フィルタの適用例を図 3b に示す。

3.4 非配線領域除去

本項では、課題 4「スパーサーやシルク印刷部による配線の誤検出」に対する画像処理について述べる。課題 4 は、試作実習基板の四隅に取り付けられたスパーサーやユニバーサル基板製造時に印刷されるシルク印刷といった配線ではない部分（以下、非配線部）が明瞭な輪郭を持つため、誤って配線として認識される課題である。これに対し、本処理では画像中の配線部と非配線部の分布に着目し、マスク処理によってそれらの領域の分

離を図った。

各領域の分布について、非配線部は基板外形の縁付近に存在している。一方で、配線部は中央部に集中している。これらに対して、まず、グレースケール画像に対してモルフォロジー変換を適用し、等間隔に形成された銅パターンの輪郭を強調する。その後、輝度値でヒストグラム解析を行い、各領域の境界位置を検出した上で、矩形のマスク領域を生成した。このマスクを適用することで、配線パターン抽出の対象領域を銅パターン中心部に限定し、非配線部の影響を除去した。マスク適用例を図 3c に示す。

3.5 銅パターン抽出

本項では、課題 3「撮影画像の回転・位置ずれに伴う座標検出誤差」および課題 5「等間隔に形成された銅パターンの抽出」に対する画像処理について述べる。課題 3 は、第 3.2 項「基板抽出・角度補正」処理に続き、さらに正確に両面画像を結合可能にするためその基準座標の設定が必要である。課題 5 は、ユニバーサル基板の特徴的な構造である周期的な銅パターン構造の認識と抽出に関する課題であり、これらに対して本処理では、画像のテクスチャ解析を適用し、連続かつ周期的な形状のパターンである銅パターンおよび貫通孔を抽出を行い、その貫通孔を基準座標として整合性の確保を図った。

具体的には、グレースケール画像に対してモルフォロジー変換を適用し、銅パターンの輪郭を強調した画像を生成する。さらに自己相関画像を生成し、テクスチャ解析を行う。自己相関画像の生成には、自己相関関数とそのフーリエ変換の関係を示すウィーナー＝ヒンチンの定理を用い、この定理により、画像のフーリエスペクトルの逆フーリエ変換によって自己相関関数を得ることができ、空間的な周期性を周波数領域で可視化することができる。自己相関画像の生成例を図 3d に示す。

3.6 配線パターン解析

本項では、第 3.2 項～第 3.5 項で適用した前処理に続き、配線パターンの解析および復元手法について述べる。本手法では、主に第 3.3 項で得られた Frangi フィルタによる配線強調画像と、第 3.5 項で抽出された銅パターンの位置情報を用い、各銅パターン間の接続関係を解析・復元した。

具体的には、まず、第 3.3 項で Frangi フィルタにより強調された配線画像を二値化し、細線化処理を行う。次に、各細線にラベリングを施し、個々の配線を識別可能にする。このラベルを以下、配線ラベルと呼ぶ。なお、銅パターンは画像上で輪郭が二重の円状構造として現れ、同一線上にないため、視覚的には配線が分離されて認識される。これに対して、本処理では第 3.5 項で得られた銅パターン領域を基準とし、各領域に含まれる配線ラベルを統合することで、同一の導通構造として再構成を行う。この処理により、視覚的な分離にかかわらず実際の電気的接続関係を反映した配線パターンの復元が可能となる。

これらの処理により、各銅パターン領域に対して配線ラベルが付与される。複数の銅パターン領域に共通の配線ラベルが含まれている場合、それらは配線によって導通していると判断できる。これにより、配線ごとの識別を保持したまま、回路全体の接続関係を高精度に抽出することが可能となる。解析・復元結果は、部品面から抽

出した情報と結合する際に、画像中の銅パターンおよび貫通孔の位置を基準とした対応付けに活用できる。

3.7 評価指標

本項では、第 3.1 項～第 3.6 項で適用した配線パターン解析法によって得られた解析・復元結果の評価指標について述べる。評価は、配線の復元精度を示す Restoration Rate (以下, RR) を用いて行った。RR の算出には以下の式を用い、目視および導通試験に基づいて作成した理想的な配線ラベルパターン (以下, 理想パターン) と、本機能によって得られた復元結果 (以下, 復元パターン) との一致度により算出する。

$$RR = \frac{N_{\text{match}}}{N_{\text{total}}} \quad (1)$$

ここで、 N_{match} は理想パターンと復元パターンの間で一致した配線ラベルの数、 N_{total} は理想パターンに含まれる配線ラベルの総数を表す。

本研究では、複数の試作実習基板に対して本手法を適用し、復元精度を統計的に評価した。具体的には、全基板に対して得られた RR から、平均復元率 (RR_{avg})、標準偏差 (σ)、および分散 (σ^2) を算出し、本機能および処理ステップの安定性および基板間の個体差に対する適用可能性を検証した。

4 回路図グラフ変換機能

本節では、第 2 節で挙げた課題 6「部品の端子と配線パターン間の接続関係の抽出」に対して、リレーショナルデータベースを活用した情報結合および回路図グラフへの変換処理について述べる。

本処理では、データベースマネジメントシステムとして MariaDB¹¹ を用い、図 5 に示すようなデータベース構造を設計・構築することで、部品面および配線面から抽出された情報の一元的な管理と結合を実現した。データベースは、以下のテーブルによって構成した。

1. 結合テーブル:

各面における貫通孔位置および銅パターン位置部分の対応関係を示すテーブル

2. 部品面抽出結果テーブル:

部品面における貫通孔位置やそこに挿入された部品およびその端子番号を示すテーブル

3. 配線面抽出結果テーブル:

配線面における銅パターン位置やその配線ラベルを示すテーブル

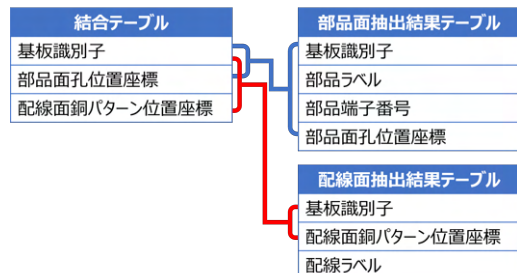


図 5: 部品・配線情報結合のためのデータベース構造

部品面と配線面のデータは、基板識別子および孔、銅パターンの位置座標情報をキーとして相互に結合する。これにより、部品の各端子と配線ラベルとの対応関係を

以下の形式で導出することができる。

基板識別子	部品ラベル	部品端子番号	配線ラベル
-------	-------	--------	-------

さらに、部品ラベルに対応する型番やパラメータ情報は、教員が提示する部品表から取得可能であり、これらを別テーブルとして追加することで、より詳細な回路構成の把握や自動回路図生成への応用が可能となる。

得られた変換結果は、試作実習基板の部品面および配線面から目視および導通試験によって作成した理想的な接続結果と比較することで、変換誤差の有無やその妥当性を検証した。

5 検証結果

本節では、配線パターン抽出機能および回路図グラフ変換機能の適用結果について述べる。

まず、配線パターン抽出機能について、17 枚の試作実習基板画像に適用し、平均復元率 (RR_{avg})、標準偏差 (σ)、および分散 (σ^2) を算出した。さらに、誤認識傾向の把握と課題の特定のため、配線部と、非配線部を分離して算出した。算出結果を表 3 に示す。結果は、高い復元率を示し、標準偏差および分散も小さく、複数の試作実習基板に対して安定した性能を有することが確認された。これは、林ら⁵の報告と同様で、提案手法が配線パターン全体の抽出に対して高い有効性を持つことを示している。しかし、配線部と非配線部の復元率には顕著な差が見られた。非配線部における復元率は 0.99727 と極めて高く、不要な配線を誤って抽出する誤認識がほとんど発生していない。一方、配線部の復元率は 0.66914 に留まっており、正しい接続の抽出には一定の誤差が含まれていることが分かる。この要因には、銅パターンの細線化や接続関係の曖昧さに起因する認識難さ、画像処理上のノイズなどが考えられる。特に、銅パターン上を通過しない配線パターンにおいて、配線ラベルの統合が不十分であった可能性があり、これが復元精度の低下要因となっていると推察される。手配線では必ずしも銅パターン上を通過するとは限らないため、こうした柔軟な配線経路に対応可能な処理の導入が今後の課題である。

表 3: 配線パターン抽出機能適用結果

	PP_{avg}	σ	σ^2
全体	0.93299	0.03977	0.00158
配線部	0.66914	0.17120	0.02931
非配線部	0.99727	0.00378	0.00001

続いて、回路図グラフ変換機能について検証を行った。本機能の評価には、17 枚の試作実習基板に対して、部品面および配線面から作成した理想的な抽出結果を用いた。その結果、全ての試作実習基板において、部品端子と配線ラベルとの対応関係に矛盾は見られず、誤接続も発生しなかった。これにより、本機能による変換が回路の接続関係を構成する上で妥当であることが確認された。

以上より、回路図復元機能全体としての精度は、配線パターン抽出機能の結果に依存していることが明らかとなった。

6 結論

本研究では、ユニバーサル基板上に試作された電子回路の画像から回路図を復元するために配線パターン抽出機能および回路図グラフ変換機能を提案し、実際の試作

実習基板を用いてその有効性を検証した。配線パターン抽出機能は、全体として高い復元率を示し、特に非配線部においてはほぼ誤認識のない高精度な抽出が可能であることが確認された。一方で、配線部においては接続関係の曖昧さや画像処理上のノイズに起因する誤差が依然として課題として残ることが分かった。また、回路図グラフ変換機能は、部品端子と配線ラベルの対応付けにおいて全試作実習基板で誤接続が発生せず、正確な回路構造の復元に有効であることが確認された。このことから、回路図復元の精度向上には配線パターン抽出機能のさらなる改善が鍵となる。今後は、配線部の復元精度を向上させるための配線パターンの正確な抽出やラベリング処理といった画像処理ステップを検討する。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP24K15243 の助成を受けて実施しました。ここに深く感謝申し上げます。また、本研究を進めるにあたり、北陸職業能力開発大学校 石川哲先生、齋藤竜馬先生、戸塚俊秀先生、山中光定先生より評価対象となる試作実習基板をご提供いただきましたことに対し、厚く御礼申し上げます。さらに、職業能力開発総合大学校 小泉天翔様には、基板の撮影にご協力いただきましたこと厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 数哲郎. オンラインによる電気実験実習の実施. 次世代教員養成センター研究紀要 = *Bulletin of Teacher Education Center for the Future Generation*, 7:79–90, 03 2021.
- [2] 斎藤 正義. 回路基板の不良箇所を特定する技能を向上するための教材開発とその効果. *PTU フォーラム 2023 第 31 回 職業能力開発研究発表講演会 講演論文*, 2023(24-A-3), 2023.
- [3] Tetsuya Hayashi, Kenji Terada, Masaki Endo, Tsuyoshi Tanaka, and Shigeyoshi Ohno. Initial methodology of troubleshooting assist system for electronic circuit skills training [poster]. *MMEDIA 2024*, 2024.
- [4] Tetsuya Hayashi, Tsuyoshi Tanaka, Toshihide Tozuka, Masaki Endo, Kenji Terada, and Shigeyoshi Ohno. Improving training efficiency in electronic circuit assembly using digital technology [poster]. *The 23th Annual Hawaii International Conference on Education*, 2025.
- [5] Tetsuya Hayashi, Tsuyoshi Tanaka, Masaki Endo, Kenji Terada, and Shigeyoshi Ohno. Initial methodology for estimating the cause of operating defects by schematic restoration from electronic circuit board images. *2025 International Conference on Information Management (ICIM2025)*, 2025.
- [6] 河野広岳 and 青柳誠司. 2a1-c06 サポートベクタマシンを用いた画像処理による電子回路基板からのコンデンサの抽出. In *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2006*, pages 2A1–C06_1. 一般社団法人 日本機械学会, 2006.
- [7] 茂木友哉, 滑川光裕, 植田佳典, et al. 電子基板の部品挿入もれ判定における基礎研究. 第 75 回全国大会講演論文集, 2013(1):597–598, 2013.
- [8] Opencv. <https://opencv.org/>, 2025. アクセス日: 2025-06-09.
- [9] 大津展之. 判別および最小 2 乗規準に基づく自動しきい値選定法. *電子情報通信学会論文誌 D*, 63(4):349–356, 1980.
- [10] Tim Jerman, Franjo Pernuš, Boštjan Likar, and Žiga Špičlin. Beyond frangi: an improved multiscale vesselness filter. In *Medical imaging 2015: Image processing*, volume 9413, pages 623–633. SPIE, 2015.
- [11] Mariadb server. <https://mariadb.org/>, 2025. アクセス日: 2025-06-09.