

折り紙スピーカのための電極の連続配線可否判別

奥谷文徳[†] 齊藤一哉[†] 加藤邦拓[†] 川原圭博[†]
 東京大学大学院情報理工学系研究科 電子情報学専攻[†]

1 はじめに

折り紙は、大きな構造をコンパクトに収納できる性質から宇宙展開構造物に、強い構造を軽い材料で実現できる性質から折り紙構造建築などに、様々な分野に応用されてきた。そして、物理特性を活かした構造だけでなく、折り紙の小面を電極として用いることで、スピーカやキャパシタなどを製造する電子回路的な応用が増加している。平坦折りの展開図は2色に塗り分けられることが知られており、2色への塗り分けは、平坦折りの裏表だけでなく、電極として用いる場合の正極と負極に応用できる。しかし各小面への配線が問題となり、製作者が電極パターンを適切に設計することで、ジャンプワイヤを必要としない配線を実現してきた。

この手間を削減するため、我々は折り線パターンからジャンプワイヤを必要としない連続配線の自動生成に挑んだが、連続配線不可能なパターンも存在した。そこで、「折り線パターンに対する連続配線の可否判別」と「具体的な連続配線の導出」の2個の問題に取り組んだ。本論文では、判別法「折り紙の周囲の色の切り替わりが2回以下であれば、連続した2色への塗り分けが可能である」と、配線手法「全域木を用いて導出する、頂点の配色を用いた具体的な連続配線」を示す。

2 関連研究

「平坦折り」とは平坦に折られた折り紙やその折り方を指す。平坦折りの展開図は、折られた状態で表の小面と裏の小面に色を割り当てることで、同じ色の小面が辺で接しない2色での塗り分けが可能である。

平坦に折られた時、折り紙の小面同士は非常に接近した平板となる。そのため、小面対に電位差を与えることでスピーカやキャパシタに応用可能である。上記のように、小面の2色を電極の正極・負極に対応させることでスピーカやキャパシタの機能が実現できる。

しかし、小面全てに電圧を印加するために小面同士をジャンプワイヤで接続する作業は煩雑である。小面の頂点のパターンを工夫することで、連続な電極を実現していたが、この作業は単純ではないため熟練者にも難しい上、連続な電極が不可能なパターンも見受けられた。そこで、誰でも短時間で連続な電極を実現するために、折り線パターンから連続な電極が可能かの判別手法と、可能な場合に対する頂点付近の電極パターンの工夫による連続配線パターンの導出手法を紹介する。

3 連続配線可否判別

図1(a)と(b)のような連続配線不可能な折り線パターンと、図1(a')と(b')のような連続配線可能な折り線パターンを判別する手法を紹介する。判別手法は

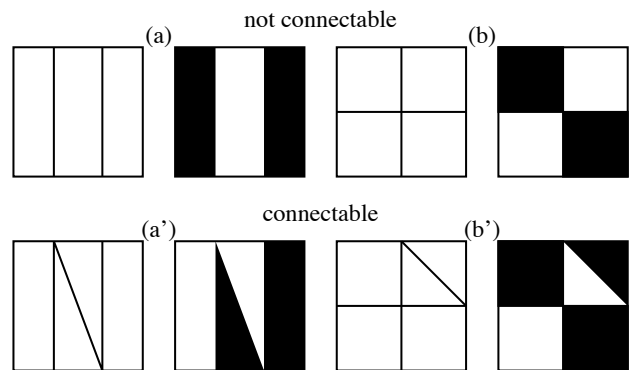


図1: 2色塗り分けと連続配線可否. (a)と(b)は2色塗り分け可能だが、連続配線は不可能である。一方、(a')と(b')は連続配線が可能である。

「外周と辺を共有する小面に注目し、その色の切り替わりが一周する間に2回以下であれば、連続配線が可能、そうでなければ不可能」である。色の切り替わりが3回以上である場合、図1(a)のように片方の色が連続にできないか、図1(b)のように向かい合う黒色の小面を連続にすると白色が連続ではなくなり、向かい合う白色の小面を連続にすると黒色が連続ではなくなることで、どちらかが不連続になってしまう。色の切り替わりが2回以下である場合、以下の手法で塗り分けられる。

[†]Fuminori Okuya, Kazuya Saito, Kunihiko Kato, and Yoshihiro Kawahara

[†]Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

4 連続配線手法

上記の判別法で連続配線の可否は判定できるが、連続配線可能であるならば配線は無作為に行っても連続配線可能とは限らない。例えば、図 2(a) は図 2(b) の様に 2 色塗り分け可能であり、小面の色の切り替わりが 0 回であるため、図 2(c) のように連続配線可能である。しかし、図 2(d) のように黒い小面を接続すると、白い小面は連続配線が不可能になってしまう。このよ

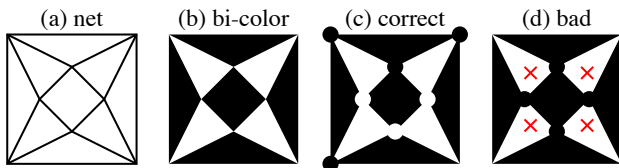


図 2: 連続配線がうまくいく例とうまくいかない例。図中の黒い小面は正極を、白い小面は負極を表し、小面の頂点で小面を電氣的に接続する。(a) 塗り分け可能な折り紙の展開図。(b) 2 色塗り分け。この折り線パターンは (c) に示す接続により連続配線可能だが、(d) のように連続配線が不可能になる接続パターンも存在する。

うに、配線可能である電極パターンに対して実際の連続配線が容易に得られるとは限らない。そこで、具体例を用いて適切な配線生成アルゴリズムを説明する。

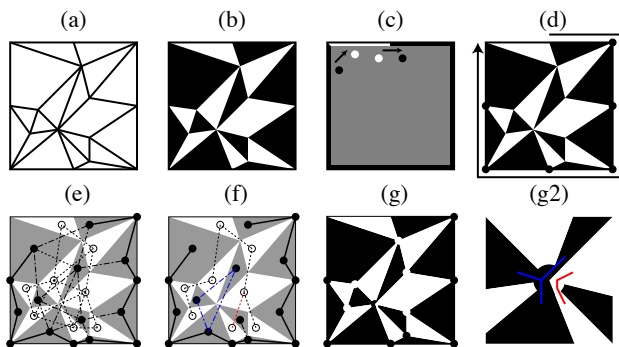


図 3: 塗り分け可否の判別 (a - c) と全域木を用いた配線導出 (d - g)。小面の隣接関係を表すグラフの全域木の接続と対応する配線により連続配線が可能である。

まず、図 3(a) のパターンが与えられたとする [1]。図 3(a) は平坦折り可能な折り線パターンであるため、好きな小面から辺で隣接する小面を順に異なる色に塗る操作により、図 3(b) の 2 色塗り分けが一意に得られる。次に、外周の色に注目し、色の入れ替わりが 2 回以下、つまり連続配線可能であることを確認する (図 3(c))。ただし、頂点で接しない小面は連続配線できないため、全ての同じ色の小面は頂点では全域であるとする。

そして、色の切り替わりが生じる頂点以外の外周の小面を、その隣接する小面の色で連結する (図 3(d))。ただし、外周での色の切り替わりが 1 回もない場合は、外周と辺を共有しない色の小面が外周と共有する頂点の 1 つを外周と辺を共有しない色の頂点とする。

ここで、片方の色 (図中の白) に対して、小面を頂点とし頂点での隣接を辺とするグラフ (図 3(e) の点線) と、図 3(f) のようなそのグラフの頂点に対する部分グラフである全域木の辺を求める。そして、図 3(g) のように、この全域木の連結に対応するように頂点に配線パターンを付加することで連続配線が実現する。

この全域木の、全域は全電極を配線する性質に、木は配線がループを持たない性質に対応する。ループを含まない配線はもう片方の色 (図中の黒) の小面を孤立させない。正確には、図 3(f) の青いループのように、6 次以上の頂点に対して黒側はループを持ちうるが、白の小面を孤立させないため問題ない。図 3(g2) の拡大図に示すとおり、6 次以上の頂点では全域木の接続に対応するように頂点を 2 色で塗り分ける必要がある。

5 おわりに

本論文では、平坦折りの 2 色塗り分けに対する連続配線の可否判別手法と、可能な場合の具体的な配線導出アルゴリズムを紹介した。平坦折りの可否にかかわらず、全ての頂点の次数が偶数であれば「2 色塗り分け可能」である。本論文では、正方形の紙の塗り分けを図示したが、実際には任意の単連結な面で同様である。

今までは、連続配線が可能かをわからないまま、人間が手作業で連続配線を試行錯誤していた。しかし、判別手法と具体的な連続配線パターンの導出アルゴリズムができた今、存在しない連続配線パターンを模索する無駄はなくなり、そのような配線が存在すれば自動的にパターンを生成できる。このように、本研究は利用者が作成した様々な形状の折り紙などを、そのままスピーカとして使用する配線設計を大幅に簡単にした。

謝辞

本稿は、ERATO 川原万有情報網プロジェクト (グラント番号 JPMJER1501) の研究成果を含む。

参考文献

- [1] J. Mitani, "A Method for Designing Crease Patterns for Flat-Foldable Origami with Numerical Optimization," *J. Geom. Graphics*, vol.15, no.2, pp.195-201, 2011.