配線可能性を考慮したグリッドレス配線手法

富田 昌宏*, 芳野 泰成**, 蔣 洪海**,
田宮 豊**, 丸山 了**

A Gridless Routing Algorithm Based on Routability Evaluation.

Masahiro TOMITA *, Taisei YOSHINO **, Honghai JIANG **,
Yutaka TAMIYA ** and Satoru MARUYAMA **

*神戸大学大学院自然科学研究科 (〒657 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

**東京大学工学部精密機械工学科小田原研究室 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)

* The Graduate School of Science and Technology, Kobe University (1-1, Rokkodai, Nada-ku, Kobe 657)

** Department of Precision Engineering, Faculty of Engineering, University of Tokyo (7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113)

概要 近年、プリント配線板は、製造技術の向上により表面実装化、高密度実装化の一途をたどっており、実装設計は、より複雑化している。迷路法、線分探索法等の逐次の配線手法は、すでに配線した経路が後に配線されるネットを妨害し、配線率を低下させている。この問題に対して引きはがし再配線等の手法が提案されているが、未配線ネットへの考慮が不十分であった。本論文では、未配線ネットを含めた他のすべてのネットを考慮して、配線を行う自動配線手法を提案する。本手法は、熟練設計者に近い結果を得るために、バス配線を伴った階層的な配線を行う。実験の結果、本手法の有効性を確認した。

Abstract

Recent packaging technologies have made PWB layout complicated. Increasing connections between a lot of surface mounted devices (SMD's) make it difficult to apply conventional routing algorithms, such as maze running or line-search algorithm. Since they search and fix each net path one by one, they cannot achieve sufficient performance. This paper describes a gridless routing system, which evaluates influences of all nets including unrouted nets. This system also employs hierarchical routing process for bus net routing. Experimental results have shown the effectiveness of this system.

1. はじめに

近年の電子機器の大規模化、高性能化に伴い、論理装置の設計に要するコストの増大が問題となっている。プリント配線板においては、配線すべきネットの数が増大し、限られた領域の中に、より多くのネットを納めなければならなくなっている。そのため、プリント配線板全体のグローバルな視点から配線経路を決定する必要が生じている。

従来の配線手法では、実装技術に対応した設計を行うことが困難となっている。特に、以下にあげる

ように、(1)高密度化、搭載部品の多様化への対応、(2)グローバルな視点をもった配線戦略の必要性、(3)バスの増大、の3点の問題が非常に顕著である。

(1) 高密度化、搭載部品の多様化への対応

従来の配線手法である、迷路法、チャネル法等は、レイアウト平面全体を、最小単位長さの格子に仕切り、この上に端子やネットなどの配線図形を管理していた。しかし、高密度化が進んだ基板では、この格子の微細化が求められ、基板全体を網羅するために必要な格子数の増大による、膨大なメモリ使用量が問題となっている。

(2) グローバルな視点をもった配線戦略の必要性
迷路法，線分探索法のように1本1本逐次的に処理を行う手法では，局所的最適解に陥りやすく，配線性能の低下を招く。

この問題を解決するために，これまでに以下の手法が提案されている。

- i) 混雑図形を用いる手法¹⁾
- ii) 既配線のフローティングセグメント化手法²⁾
- iii) 動的配線手法^{3),4)}
- iv) 並列配線手法⁵⁾

これらは，以下の問題点をもつ。

- a) 未配線ネットの考慮がない，もしくはその配線可能性を保証しない(i)，ii)。
- b) 解を求めるまで，膨大な繰り返し処理が必要(iii)，iv)。

(3) バスの増大

バスは，同じ素子間を結ぶネットの束と定義できるが，機能的にも非常に大きな意味をもつ。素子の多ピン化によるバスの増大に伴い，バスを考慮した配線を行う必要性が高まっている。

これらの問題を解決する配線手法として，本論文では，以下の3点を特徴とする自動配線手法を提案する。

(1) 図形的なデータ表現：バケット法⁶⁾と平面走査法⁷⁾を組み合わせ，配線パターン，障害物等の任意の多角形図形のデータ管理を可能とし，グリッドレス配線の効率化を図る。

(2) 配線可能性の考慮：全ネットの配線可能性を常に考慮した経路探索により，グローバルな視点から各ネットの経路を決定し，配線率の向上を図る。

そのために，本手法では，既配線ネットを移動，変形可能なものとして扱い，未配線ネットは配線可能性を保持した連結領域（勢力範囲）として表現する。

(3) バスの束状配線：バスを，幅広ネットの「幹」と端子周りの配線の「枝」に分割して扱い，熟練設計者の設計に近い配線を行う。

なお，本論文では，まだ配線の対象としていないネットを「未配線ネット」とよび，配線を試みたが結線不可能となったネットを「未結線ネット」と区

別する。

2. 配線手法

本章では，システムの全体構成を述べた後，配線手法について，前章であげた3つの特徴に対応して詳述する。

2.1 全体構成

配線システムの構成を図1に示す。熟練設計者の設計方式を踏襲した，階層的な配線を行う。まず，プリント配線板全体の配線の流れを決定する存在であるバスを配線し，その後，バス以外のネット（単一ネットと呼ぶ）の配線を行う。双方の配線は，同じデータ構造上で表現されるため，線幅の違いを除いて，同一の配線プログラムが使用される。この配線プログラムは，バスネットを含めた，すべてのネットの影響を考慮しながら配線を進める。

2.2 図形データ管理

本手法では，グリッドレスに，格子に依存しない図形データ管理法を実現した。図形はバケット法⁶⁾と平面走査法⁷⁾との2段階方式で管理する（図2）。

レイアウト平面上に存在する図形の多くは端子またはネット図形である。その大きさはレイアウト平

図1. 全体構成

面に比べて十分に小さく、図形の検索や重なり判定が局所的な問題で済む場合が多い。レイアウト平面をおおまかにバケットで管理し、そのバケットを細かく平面走査法で管理する2段階方式によって、時間的および空間的にデータ管理の効率化が可能となるからである。

ある指定領域内に存在する図形の検索を行う場合、まず、その領域が含まれるバケットを求めるが、座標計算によって直接対応付けが行われるので、セグメントの個数によらず、 $O(1)$ で求められる。バケット内では平面走査法を適用し、木構造で図形セグメントのデータを管理することによって、ある領域（長方形）と交差する長方形を $O(n \log n)$ で検索できる（ n は図形セグメントの個数）⁷⁾。したがって、両者の併用により $O(n \log n)$ で検索を行いつつ、領域分割によって n を小さく抑えることが可能となる。

2.3 経路探索手法

本手法において特徴的な既配線および未配線ネット

図 2. 図形データ管理

トのモデル化と、経路探索手法について述べる。

2.3.1 既配線ネットのモデル

既配線ネットは、移動・変形可能なフローティングセグメントとしてモデル化される。

既配線ネットに移動、変形を許すことで、配線順序の影響を低減することが可能である。つまり、図3のような場合、配線幅が不十分な場所においても、既配線ネットを「押し寄せ」て、配線スペースを確保することにより、新しい経路の配線が可能となる。

既配線ネットの上方向の「押し寄せ」のアルゴリズムを例（図4）により説明する。

指定された「押し寄せ」の方向に設計規則を犯さない、十分な配線領域が見つかるまで再帰的な操作を行う。以下に、フローを示す。

- (0) 仮定：はじめに、押し寄せられるセグメントと、このセグメントが回避しなければならない範囲（回避範囲）が指定される。
- (1) 探索範囲の生成：回避範囲を左右と上方向（上方向の押し寄せの場合）に、ネットの幅とデザインルールの和だけ拡大し、対象とするセグメントが移動するために他のネットを排除すべき探索範囲を作る（図4 a）。
- (2) 探索範囲内に存在する他のネットセグメントに対して「押し寄せ」を再帰的にを行い、探索範囲内から他ネットセグメントを排除する。

図 3. 既配線ネットの移動・変形

図4. 既配線ネットの押し寄せ

(3) セグメントの移動：探索範囲内の他ネットセグメントが排除された後、セグメントを回避範囲外へ移動させる。このとき、これに接続する同じネットのセグメントを伸縮させ、または、ジョグ（ネットの折れ曲がり）を生成する（図4 b））。

(2)において、探索範囲内に固定された障害物が存在するとき、「押し寄せ」は不可能と判断される。このような状況が発生した場合、今までとは逆向きに「押し寄せ」を試みる。つまり、あたかも、障害物によって今対象としているセグメントが押し寄せられる形になり、今までとは反対方向に配線領域を探す。

2.3.2 未配線ネットのモデル

既配線ネットが移動、変形可能なことによって、未配線ネットの結線に際して既配線が障害となることが緩和される。さらに、未配線ネット同士のトポロジカルな交差等を考慮するため、勢力範囲の概念を導入し、トポロジカルな見地に基づく配線可能性を評価する。

勢力範囲とは、未配線ネットの配線予定領域のことである。従来の配線手法では、この未配線ネットが将来通過する経路の評価が不十分であった。未配線ネットが配線されるべき範囲を図形表現することによって、次の2点において配線効率向上に寄与する。

(1) 未配線ネットの配線可能性評価

未配線ネットが勢力範囲内で配線可能か否かの判断が可能である。本手法は、できるだけ未配線ネットの配線可能性を保証するように配線作業を進めるため、プリント配線板全体から見た最適解に到達できる。

(2) 未配線ネットが他の配線に与える影響評価

未配線ネット同士の勢力範囲を比較して、それらの経路の交差を調べることができ、さらに、これを基に一方のネットについて迂回路を選択させることが可能となる。

具体的に、未配線ネットの勢力範囲とは以下の条件を満たす図形として定義する。

i) 連結領域で、かつその内部に接続すべき全端子を包含する。

勢力範囲内で経路探索を行えば、必ず経路が求められることを保証する。

ii) 他のネットの勢力範囲によって端子の連結性が損なわれていない。

自己の勢力範囲に限って経路を探索する限り、他の未配線ネットの端子を非連結しないという意味において、他の未配線ネットの考慮となる。

最初、各ネットは互いに重ならず、連結性が保証されている勢力範囲をもっている（図5）。配線作業が進むうちに、これら勢力範囲に関する上記のi), ii)の条件のいずれかが満たされない場合、アメーバのごとく領域の拡大、変形を行って、配線可能性を再び取り戻す。このアルゴリズムにおいて、既配線ネットについては、配線図形そのものを勢力範囲とする。以下に未配線ネットの勢力範囲の更新アルゴリズムを示す。

(1) 勢力範囲同士の重なり検出

すべてのネットの勢力範囲を比較し、勢力範囲の重なりを生じていたら、次に示す、端子の連結性判定を実行する。

(2) 端子の連結性判定

自己の勢力範囲のみが定義されている連結領域に、自己の端子がすべて包含されるとき、このネットの連結性は保たれていると判断する（図6）。

連結性の判定は、端子周りの勢力範囲の輪郭線を内側にたどることによって可能である。同じネットに属す

図5. 未配線ネットの勢力範囲

図6. 端子の連結性判定

る端子が同一の境界を有するとき、これらは同一の連結領域にあり、このネットは配線可能と判断される。そうでないときは、配線可能性は損なわれており、次の(3)勢力範囲の変形を実行する。

細線：○を端子とするネットの勢力範囲
太線：×を端子とするネットの勢力範囲

図7. 勢力範囲の変形

図8. 経路探索フロー

(3) 勢力範囲の変形

勢力範囲が重なっている地点から勢力範囲の輪郭線の外側をたどる。その部分のみ拡大することで端子の連結性を取り戻す(図7)。

なお、未配線ネットの勢力範囲の初期形状は、すべての端子を含む最小矩形で定義される。

この手法は未配線ネットのトポロジを保存するが、その際、配線容量までは考慮していないため、完全な未配線考慮にはなっていない。

2.3.3 経路探索

前述の図形データ管理法と他ネット考慮法をふまえた経路探索法について、以下に述べる。

経路探索は、(1)経路候補探索、(2)既配線ネットの移動、変形、および(3)未配線ネットの勢力範囲更新の3つの主要な処理から成る(図8)。

(1) 経路候補探索

自己の勢力範囲内で、経路候補をコスト付き迷路法によってタイル平面上的タイルをたどって求める。このときの条件として以下の3つがある。

- i) 既配線または障害物との接触および許容最小間隔以下の接近を許す。

これは、デザインルールに違反する事項であるが、次の段階で行われる既配線の移動、変形によって必ず回避できる保証がある。

- ii) 配線長と折れ曲がり回数をコストとし、これを最小化する。
- iii) 障害物間に定義する配線容量を満たす。

障害物の間に定義されている配線容量と、これまでにその障害物の間を通過している既配線ネットのもつ線幅の合計より、探索した経路が通過するために十分な余裕があるか否かを調べる。

(2) 既配線ネットの移動、変形

前項のデザインルール違反が起きた場合、これを回避する方向に既配線ネットを押し寄せる。

(3) 未配線ネットの勢力範囲更新

新しく引かれた配線および既配線ネットセグメントの移動により、未配線ネットの勢力範囲の配線可能性が損なわれる場合がある。このとき、再び配線可能性を取り戻すために、勢力範囲の更新を行う。

2.4 バス配線

バスは、2つの種類のサブネット、すなわち、束状になったバスネットの経路に対応する「幹」と個々のネットがバスの束から離れて各端子に接続する配線の「枝」とに分割モデル化する。図9にこの様子を示す。a) は配線すべきバスネットを b) はバスのモデルを表している。すべてのバスの「幹」を幅広ネットとして配線した後、これを個々のネットのセグメントに分解し、それらと端子を結ぶ「枝」を配線してネット全体を完成させる。このとき、幹の両端および枝の片端には移動可能な仮想端子を設定する。幹および枝についても勢力範囲を定義し、連結性は仮想端子を含めて考慮する。

3. 実験と考察

提案した手法をプログラムで実現し、実験評価を行った。

3.1 評価項目

実験の評価項目を以下に示す。

- (1) 図形データ管理法の有効性
- (2) 未配線ネット考慮配線の有効性

図9. バス配線

(3) バス配線手法の有効性

本実験で用いた基板は、いずれも QFP 等の表面実装素子を搭載した実在の民生用基板である。また、これらは信号線の配線に2層使用するように設計されたデータであるが、今回は1層配線を行う。本手法の実現環境を以下に示す。

- i) EWS : 日立2050/32ワークステーション
(CPU : MC 68020, 1 MIPS)
- ii) ソフトウェア (C 言語) : 約12,000行

3.2 図形データ管理法の有効性

本手法と、グリッドベース法をレイアウト平面の分割数で比較した結果を表1に示す。

グリッドベース法に対してタイル数が1/10以下と少なく、効率のよいデータ表現が実現されている。また、バケット数を100から400に増加させることによりタイル総数が約 $\frac{1}{2}$ ~ $\frac{1}{4}$ に低減され、平面走査法のみ活用している他の手法に比べて、有効と判断される。

3.3 未配線ネット考慮配線の有効性

未配線ネットを考慮した場合としない場合について、1層配線した結果を表2に示す。いずれの例についても、未配線ネットを考慮した場合、1.6~1.7%配線率が向上している。未配線ネットを勢力範囲で

表 1. グリッドレス配線の効果

回路名	基板の規模			グリッドベース(グリッド数)		本手法(タイル数)	
	サイズ	素子数	ネット数	ピン間3本	ピン間5本	バケット数100	バケット数400
A	50×225	12(8)	161	62,775	111,600	14,232	9,742
B	149×170	30(1)	282	141,341	251,274	44,997	11,724
C	231×176	47(40)	499	226,860	403,308	79,660	19,537

サイズ：単位は (mm)，素子数： () 内は表面実装部品数

表 2. 実験結果

回路名	ネット数	未配線ネット考慮あり		未配線ネット考慮なし	
		配線率	処理時間(分)	配線率	処理時間(分)
A	161	119(73.9%)	118	117(72.7%)	107
B	282	191(67.7%)	347	188(66.7%)	230
C	499	303(60.7%)	1,533	295(59.1%)	397

表現することにより1層配線ではトポロジカルな交差を生じるネットを早い段階で未結線とし、無理に配線しないため、プリント配線板全体からみて効率のよい配線を行うことができる。

反面、未配線ネットを考慮すると処理時間が増大する。ネット数を n としたとき、この処理に最大 $O(n!)$ の手間がかかるが、実験より $O(n^4)$ との結果を得た。これは、勢力範囲の比較、更新が2ネットの勢力範囲のみを対象としていることによる。2ネット間の勢力範囲の調停を繰り返し、すべてのネットの勢力範囲の交差が解消するまでかなりの時間が必要となるためである。また、未配線ネット考慮以外の処理時間は $O(n^{1.5})$ となる。

3.4 バス配線手法の有効性

基板Bの配線図を図10に示す。この例では、人手配線でみられる、束状のバス配線が実現されている。本手法では、一度、既配線セグメントが押し寄せられると、これ以後、バスは互いに寄り添った状態に変形、移動するという性質をもつ。また、バスに無関係なネットも束ねられる傾向にあり、人手配線に近い結果が得られる要因となっている。

3.5 実用システムへの検討項目

以上により、本手法は、いくつかの問題点を含むが、高密度化するプリント配線板の配線手法として有効と考えられる。

本手法を実用化する際に、前節までにあげた問題

図10. 配線例

以外に、今後、下記の2点の課題を解決しなければならない。

(1) 多層化への拡張

多層基板に対応するために、層ごとに図形を管理するマップを用意し、上下層を結ぶビアとしての役

割をもつ、可動な仮想端子を導入する必要がある。

(2) 専用ハードウェア化による QTAT の実現

種々の配置結果に対して QTAT で繰り返し配線評価する環境を提供するために、専用ハードウェア化による高速処理の実現が必要となる。

4. おわりに

本研究では、プリント配線板を対象とした、配線可能性を考慮したグリッドレスな自動配線手法を提案した。実験により、以下の3つの問題に対する有効性を確認した。

- (1) バケット法と平面走査法の組み合わせによる、高密度化、搭載部品の多様化への対応
- (2) 未配線ネットをも考慮したグローバルな視点からの配線戦略による配線効率の向上
- (3) バスを幅広ネットとして扱うことによる熟練者に近いバス配線の達成

今後、多層配線を実現すると同時に、高速化を図った実用システムへの拡張が必要である。

謝 辞

本研究の一部は大川情報通信基金、助成番号89-22 (平成元年度)「経験的知識を用いた自動レイアウトシステムに関する研究」の助成の下に行われた。

(1990. 4. 16-受理)

文 献

- 1) 門脇春則, 他: “敷き詰め形ゲートアレイ用の詳細配線手法とその実験”, 情報処理学会第39回全国大会論文集, pp. 1666 - 1667, 1989
- 2) S. H. Gerez, et al.: “CRACKER: A General Area Router Based on Stepwise Reshaping”, ICCAD - 89, pp. 44 - 47, 1989
- 3) Y. L. Lin, et al.: “A Detailed Router Based on Simulated Evolution”, ICCAD - 88, pp. 38 - 41, 1988
- 4) 行川俊正, 他: “引き剥し再配線手法の効率化と評価”, 電子情報通信学会技術研究報告, VLD88-91, pp. 39 - 46, 1989
- 5) 進藤達也, 他: “プロセッサの協調動作に基づく並列配線手法”, 電子通信学会技術報告, CAS85-152, pp. 33 - 40, 1985
- 6) T. Asano, et al.: “Practical Use of Bucketing Techniques in Computational Geometry”, G. T. Toussaint, ed., North - Holland, Amsterdam, pp. 153 - 195, 1985
- 7) D. T. Lee, et al.: “Location of a Point in a Planar Subdivision and Its Applications”, SIAM J. on Computing, Vol. 6, No. 3, pp. 546 - 606, 1977