

3層配線問題の制約付きビア数最小化手法

高橋和弘† 渡邊敏正††

† 広島大学大学院工学研究科 情報工学専攻

†† 広島大学工学部 第二類 回路システム工学講座

〒739 東広島市鏡山一丁目 4-1

(電話) 0824-24-7662 (渡邊), -7661(高橋)

(ファクシミリ) 0824-22-7195

(電子メール) {kazu;watanabe}@huis.hiroshima-u.ac.jp

概要: 多層配線問題においてレイアウト全体のビア数を最小化することは、製造コストや製品の信頼性という点において重要であり、これはビア数最小化問題と呼ばれている。ビア数最小化問題には、配線とビア数の最小化を同時に行なう Unconstrained via minimization と、あらかじめ配線経路は決められており層割り当てを変えることによってビア数の最小化を行なう Constrained via minimization の 2種類がある。既に、3層配線問題の Constrained via minimization でさえも NP 完全であることが知られている。本稿では、3層配線問題の Constrained via minimization に対して、幅優先探索を利用した近似解法を提案し、その性能を実験的に評価する。

キーワード: ビア数最小化、隣接ビア、幅優先探索、クロストーク

Constrained Via Minimization for Three Layer Routing Problems

Kazuhiro Takahashi† and Toshimasa Watanabe††

† Graduate School of Engineering, Hiroshima University

†† Department of Circuits and Systems, Faculty of Engineering, Hiroshima University

4-1, Kagamiyama 1-chome, Higashi-Hiroshima, 739 Japan

Phone : +81-824-24-7662 (Watanabe)

Faxsimile : +81-824-22-7195

E-mail : watanabe@huis.hiroshima-u.ac.jp

Abstract : The via minimization problem is the problem of minimizing the number of vias in multi-layer routing problems, and it is important in order to prevent both increase in production cost and deterioration of reliability. It consists of two kinds of problems: the unconstrained via minimization problem and the constrained via minimization one. The former incorporates via minimization into routing, while the latter tries to minimize the number of vias by changing the layer assignment of nets whose routing are given. It has already been known that even the constrained via minimization for three layer routing problems is NP-complete. The subject of the paper is to propose a heuristic algorithm based on the breadth-first search, and experimental results are provided to show capability of the proposed algorithm.

Key words : Via minimization, Adjacent vias, Breadth-first search, Crosstalk

1 まえがき

多層配線は、現在の VLSI 設計やプリント基板レイアウト設計において必要不可欠である。ほとんどの多層配線問題の近似解法アルゴリズムは、一つの層内では決められた方向(例えば水平方向か垂直方向)にのみ配線を行ない、隣接した層間では異方向の配線を行うため多くのビアを生じてしまう。ビアとは異層間の配線を接続するために用いられるスルーホールである。ビアの増加に伴い生産コストや配線領域が増大し、信頼性に問題が生じることからビア総数の少ないレイアウト設計が要求される。これをビア数最小化問題という。ビア数最小化問題は 2 種類ある。一つは、配線とビア数最小化を同時に行なう制約なしビア数最小化問題[10]である。他は、配線経路は既に決定しているときに、配線の層割り当てのみを変えることによりビア数の最小化を行なう制約付きビア数最小化問題[3, 4, 5, 6, 7]である。後者については、2 層配線は多項式時間で最適解が求まることが[1]で証明されている。しかし、[3]で 3 層配線でさえ NP 完全であるということが証明されており、今まで[4]～[7]において、3 層配線問題の制約付きビア数最小化の近似解法が提案されている。以下、3 層配線問題の制約付きビア数最小化を 3CVM と表す。[3]では初めて 3CVM の近似解法が提案され、[4]では、Segment-crossing graph(後述)を提案し、それを利用した 3CVM の近似解法が提案されている。[5]は[4]を拡張した近似解法を提案し、[6]は Segment-crossing graph を利用した多層配線問題の制約付きビア数最小化の近似解法を提案している。[7]は、対象とするレイアウトを HVH 型に限定した近似解法を提案すると同時に、HVH 型の 3CVM が NP-hard であること、更に以下で示す 4 つの制約を付加しても NP-hard であることを証明している。HVH 型とは 1 層と 3 層は水平方向のみの配線が許され、2 層は垂直方向のみの配線が許されているレイアウトである。

- HVH 型の 3CVM の全てのネットは 2 端子ネット
- HVH 型の 3CVM の各ネット同士の水平(垂直)方向の重なりは存在しない
- 最大の junction(ネットの配線の曲り角)の degree が 2 である
- ビアは junction にしか配置しない

上述した[4, 5, 6]の手法は、対象とするレイアウトに制限はない。しかし、手法適用後に得られるレイアウトにおいて、ビアを通過するネット配線が存在する可能性がある。

本研究では 3CVM に対して、幅優先探索(BFS)に基づいて、やはり対象とするレイアウトに制限を与えることなく、しかもこのようないくつかのビアを通過するネット配線の存在を許さない解法を提案する。また、製品の信頼性の低下防止という点ではビア数の減少だけでなく crosstalk の低減も考慮する必要がある。Crosstalk とは近接したネットの配線間で生じる coupling capacitance(図 5)に起因する信号遅延の増加や完全な信号が送れなくなるという現象である。本研究では、レイアウト内のビア数の最小化とともに crosstalk の低減化を考慮した手法も提案する。

2 制約付きビア数最小化手法の分類

[4]では、制約付きビア数最小化の近似解法を Local sense algorithm と Global sense algorithm の 2 種類に分類している。Global sense algorithm とは対象とするレイアウトの層割り当てを利用しないアルゴリズムである。レイアウト内の全ての segment を層割り当てがされていない状態に初期設定し、できるだけビア数が少なくなるように再割り当てを行ないビア数が最小化されたレイアウトを求める。Local sense algorithm は対象とするレイアウトの層割り当てを利用するアルゴリズムである。レイアウトの全てのビアを 1 つずつ調べ、除去できるビアがあれば除去するという操作を繰り返すことによりビア数が最小化されたレイアウトを求める。[3]で提案されている近似解法は Local sense algorithm に属し、[4, 5]は Global sense algorithm に属する。Local sense algorithm は小規模なデータにのみ適しており、一般的には Global sense algorithm の方が良い結果が得られる。しかし、Local sense algorithm は Global sense algorithm によって、得られたレイアウトの結果を更に改良するのに役立つ。このことから、[6, 7]で提案されている近似解法は Global sense algorithm と Local sense algorithm の両方を考慮している。本研究も[6, 7]と同様に両方を考慮する近似解法を提案する。

3 本研究での制約条件と レイアウトのグラフ化

3.1 制約条件

[4, 5, 6, 7]等では、端子から junction まで、junction から junction までを一つの単位として扱い、各々を segment と呼んでいる。これらで提案されている近似解法はビアの配置できる場所を junction に限定しているが、[7]でビアの位置を junction に限定しても NP-hard であることが証明されている。本研究でもビアは junction にしか配置しないという制約条件のもとでの近似解法を提案する。

3.2 レイアウトのグラフ化

[3, 4, 5, 6]で提案されている近似解法は与えられたレイアウトをグラフ化し、そのグラフに対し各々の手法を適用してビア数が最小化されたレイアウトを求めている。グラフは Via-crossing graph(VCG)[3]と Segment-crossing graph(SCG)[4]の 2 種類提案されている。VCG とは[3]で使用されている Local sense algorithm 向けのグラフである。Segment を一つの頂点で表し、segment 同士が交差していればそれらの segment に相当する頂点間に辺を付加する。またビアを segment とは異なる頂点で表し、segment がビアに接続していればその頂点間に交差の辺と

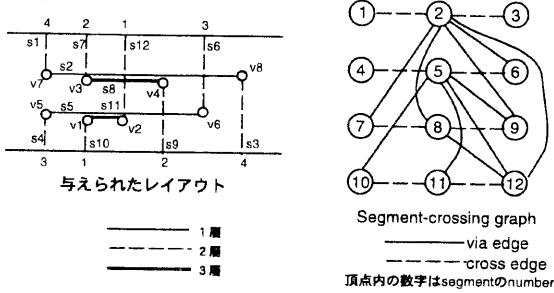


図 1: Segment-crossing graph(SCG) の例

は異なる辺を付加する。SCG とは [4] で提案され、[4, 5, 6] で使用されている Global sense algorithm 向けのグラフである(図 1)。まず、対象となるレイアウトを層割り当てがされていない状態にする。そして segment を一つの頂点で表し、segment 同士が交差していればそれらの segment に相当する頂点間に辺(cross edge)を付加する。また全ての junction をビアと仮定し、ビアで連結している segment に相当する頂点間に辺(via edge)を付加する。SCG 内の各頂点に層割り当てを行なう際、cross edge で連結している頂点同士は必ず異なる層で割り当てられなければならない。また、via edge で連結している頂点同士はできるだけ同じ層に割り当てることが望ましい。本研究では SCG を改良したグラフを使用する。

4 提案手法 (BFS に基づき隣接ビアを考慮した手法)

本研究で提案する近似解法には大きく 2 つの特徴がある。1 つ目は隣接ビアの考慮である。2 つ目はビア数の減少が最優先されるように幅優先探索(BFS)を利用していることである。以下で 2 つの特徴、本手法のアルゴリズムと各操作について説明する。

4.1 隣接ビア

図 2 は 3 層配線問題のレイアウト例の一部である。この図の中のビアの上を、このビアを含むネット a とは異なるネット b の segment3 が通過している。この図のような場合、[4, 5, 6] の手法では segment1 が 1 層に、segment2 が 3 層に、segment3 が 2 層に割り当たられる場合がある。そのように割り当てが行なわれると、ビアと segment3 が接触しショートを起こしてしまう。このことが起こらないように、本手法ではこのようなビアを隣接ビアと呼び、隣接ビアで連結している segment 同士は隣接した層にしか配置できないこととしている。すなわち、隣接ビアで連結している 2 つの segment の 1 つが 1 層(それぞれ 3 層)に割り当たっていたら、もう 1 つの segment は 3 層(それぞれ 1 層)に割り当てることができない。

本研究ではビアの位置を junction に限定しているが、このようなビアの場合には、その位置をネット

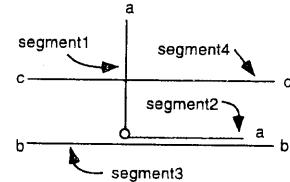


図 2: 隣接ビアの例(図中の○印)

a 上で junction から若干移動して配置できればそのようにすることにする。しかし、この図ではネット a の segment1 とネット c の segment4 が交差しているためにこのビアは junction から動かさざるを得ない。このように、移動できなかつたビアのみを隣接ビアとして扱い、移動できたビアは隣接ビアとはしない。

4.2 幅優先探索の利用

以下の 2 つの利点を考慮して、SCG(を改良したモデル)において次の層割り当てを行なう頂点の探索に BFS を利用している。

- 層割り当てが行なわれた頂点とビアまたは隣接ビアで連結している頂点に、優先的に層割り当てをおこなうことができる。
- 比較的割り当て制限の大きい(つまり、割り当てることができる層の数が少ない)頂点を選ぶ傾向がある。

なお、通常の BFS では、1 つのレベル内の全ての頂点から探索できる未訪問の頂点を次のレベルの頂点とするが、本研究では、各レベル内の着目している 1 つの頂点のみから探索できる未訪問の頂点を次のレベルの頂点とする、という制限を付けている。この定義では、同じレベル(例えば、 l)にある頂点は、全てある 1 つの頂点から訪問されている。この頂点をレベル l の起点と呼ぶこととする。

4.3 提案アルゴリズムの概要

概要のみ述べ、各ステップの詳細を引続き説明する。

- step1: 前処理
- step2: 隣接ビアを考慮した SCG の作成
- step3: 以下の step4～step6 までの操作を終了条件を満たすまで繰り返す。
- step4: 提案する Global sense algorithm の実行(幅優先探索を利用して、隣接ビアを考慮した SCG の全ての頂点に層割り当てを行なう)。
- step5: 後処理
- step6: Local sense algorithm の実行([6] で提案されている LOCAL MINIMIZATION を適用する)。

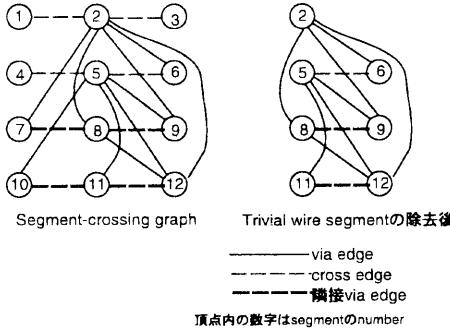


図3: 図1のレイアウトに対して、隣接ビアを考慮したSCG

4.4 前処理

対象となるレイアウトを層割り当てのされていない状態に初期化し、全てのjunctionにビアを配置する。但し、3つのネット配線が通過しているjunctionに対してはビアは配置しない。このとき、この3つのネット配線にはjunctionを構成しているネット配線が含まれる。

4.5 隣接ビアを考慮したSCGの作成

各segmentを頂点で表し、segment同士が交差していればcross edgeを付加し、ビアで連結していればvia edgeを付加する。このとき、ビアが隣接ビアならば隣接via edgeを付加する。そして、作成したグラフにおいて[7]で定義されているtrivial wire segmentに相当する頂点と、それに接続している辺を除去する。Trivial wire segmentとは、いつ層割り当てを行っても他のsegmentと交差せず、且つビアが増加しないsegmentのことである。[7]では2種類のtrivial wire segmentが定義されているが、除去の対象となるのはそのうちのビアまたは隣接ビアで連結しているsegmentである。除去した頂点に相当するsegmentの層割り当てはstep5で行なう。(図3参照)。

4.6 終了条件

以下で示す2つのどちらかの条件を満たせばアルゴリズムを終了する。

- 得られたレイアウトが3層で実現できる
- step4～step6までの操作を一定回数以上繰り返した

もし、上述した2つの条件をどちらとも満たしていないければ、Global sense algorithmの探索の出発点を変えてstep4～step6までの操作を再び行なう。一定回数繰り返して、3層で実現できたレイアウトを得ることができないならば、それまでに得られたレイアウトから4層に割り当てられているsegment数が最小のものを出力する。

4.7 提案するGlobal sense algorithm

Select, Coloring, Backtrackの3つの操作から成っている。Selectの操作で隣接ビアを考慮したSCG内から未割り当ての頂点を一つ選び、Coloringの操作によって、Selectで選んだ頂点に層割り当てを行なう。Coloringの操作で層割り当てが不可能なときはBacktrackの操作を行なう。以上の操作をBFSを利用し、グラフ内の全ての頂点に層割り当てが行なわれるまで繰り返す。以下で各操作の詳細を説明する。

4.7.1 Select

BFSにより決められた同一レベルを持つ頂点集合の中から以下で示す優先順位に基づいて、層割り当てを行なうための頂点を一つ選択することを繰り返す。同レベル内の全ての頂点に層を割り当たら、次のレベルに移り、同様の操作を行なう。

1. 現在割り当てを行なっているレベルの起点となっている頂点と隣接via edgeで連結している頂点、候補が複数あれば4へ。
2. 現在割り当てを行なっているレベルの起点となっている頂点とvia edgeで連結している頂点、複数なら4へ。
3. 現在割り当てを行なっているレベルの起点となっている頂点とcross edgeで連結している頂点、候補が複数あれば4へ。
4. 割り当てることができない層数 x が最大の頂点、候補が複数あれば5へ。
5. 接続しているcross edgeの本数が最大の頂点、候補が複数あれば6へ。
6. 接続しているvia edgeの本数が最大の頂点、候補が複数あれば7へ。
7. Segmentの番号が最小の頂点。

4.7.2 Coloring

Selectで選んだ頂点に対し、それに割り当てる層を決定する。選んだ頂点の τ の値により操作が異なる。[4]で定義されている値 $|r_\tau(u)|$ と、本研究で定義導入する $|V_\tau(u)|$ を利用する。

$|r_\tau(u)|$: 頂点 u に層 τ を割り当てるこことによって

省くことができるビア数である。

$|V_\tau(u)|$: 省けなくなるビアの数である。

頂点 u を一方の端点とする長さ2のパス P が2辺 $e_1 = (u, v)$, $e_2 = (v, w)$ から成るとする。 P が以下の条件を満たすとき、 P を u からのvia pathと呼ぼう：

- (a) 内点 v には層が割り当てられていない。
- (b) e_1, e_2 はcross edge, via edge(隣接via edge)の順かこの逆順かのいずれかである。

このとき、

$$V_\tau(u) = \{w \mid u \text{ から } w \text{への via path があり, } \\ \text{且つ } w \text{には層 } \tau \text{が} \\ \text{割り当てられている}\}.$$

1. $x = 0, 1$ のとき :
 $|r_\tau(u)|$ の値が最大の層を割り当てる。候補が複数あるなら、そのなかで $|V_\tau(u)|$ の値が最小の層を割り当てる。更にここでも候補が複数あるなら、そのなかで 2 層, 1 層, 3 層の順に割り当てる。
2. $x = 2$: 残りの一つの層を割り当てる。
3. $x = 3$: Coloring では層割り当てが不可能なので Backtrack の操作を行なう。

4.7.3 Backtrack

既に層割り当てが決まっている頂点に対し、その割り当てられている層を変えることにより、それまで割り当てが不可能であった頂点 ($x = 3$ の頂点) に層を割り当てるこを考える。本稿では [4] で提案されている手法を改良している。このとき、隣接ビアで連結している頂点同士は、同層か隣接した層にしか割り当てができないことから、Backtrack の操作の間だけは、層割り当ての対象となっている頂点 u が、1 層 (3 層) に割り当てられている頂点 w と隣接 via edge で連結している場合は、 w に割り当てられている層を 1 層 (3 層) とみなし、隣接 via edge を cross edge とみなす。また [4] で定義されている 3 つの値 $k_\tau(u)$, $|C_\tau(u)|$, $|r_\tau(u)|$ と本研究で導入した $|V_\tau(u)|$ をを利用して割り当てる層を決定する。

- $k_\tau(u)$: 頂点 u と cross edge で連結していて、
 且つ、割り当てられている層が τ であるよ
 うな頂点の持つ x の値の最大値。
 $|C_\tau(u)|$: 頂点 u と cross edge で連結していて、
 且つ割り当てられている層が τ である
 ような頂点の総数。

アルゴリズムは [4] とほとんど同じであるが、[4] では、頂点 u に割り当てを行なった後、未割り当てとなった頂点のうち $x = 3$ の頂点のみの層割り当を行なうが、本研究では未割り当てとなった頂点全てに、層割り当てを行なうこととしている。ここでは割り当てる層の決定方法を以下で示す。

1. 各層の $k_\tau(u)$ の値を計算し、その値が最小の層を割り当てる。候補が複数あるなら 2 へ。
2. その中で各層の $|C_\tau(u)|$ の値を計算し、その値が最小の層を割り当てる。候補が複数あるなら 3 へ。
3. その中で $|r_\tau(u)|$ の値を計算し、その値が最大の層を割り当てる。候補が複数あるなら 4 へ。
4. その中で $|V_\tau(u)|$ の値を計算し、その値が最小の層を割り当てる。候補が複数あるなら 5 へ。
5. その中で 2 層, 1 層, 3 層の順に割り当てる。

4.8 後処理

隣接ビアを考慮した SCG の作成時に除去した trivial wire segment に相当する頂点に、ビアが増加しないように層割り当を行なう。

4.9 Local sense algorithm[6]

Global sense algorithm から得られたレイアウトに適用する。全ての segment を一つずつ調べ、除去できるビアがあれば除去する。この操作を除去できるビアがなくなるまで、またはその数が変化しなくなるまで繰り返す。

5 Crosstalk

製造技術が進歩するにつれて、各 segment はより近接配置されるようになった。Segment 同士が近接配置されると segment 間の coupling capacitance の値が増加し、この増加に伴い信号遅延が増大したり、完全な信号が送れなくなるという現象が起こる。この現象を crosstalk という。Crosstalk に起因するノイズによって、回路に予期しない動作をが生じ、回路の信頼性低下をまねく場合がある。のことから本研究では、レイアウト全体のビア数の最小化を行なうとともに、crosstalk の低減も考慮する手法を提案する。なお、crosstalk は coupling capacitance のみでなく信号伝達時間にも依存するが、ここでは coupling capacitance にのみ着目して crosstalk を扱う。

[8] は、coupling capacitance の値にのみ着目した VHV 型の 3 層配線問題の crosstalk 最小化の手法を提案し、以下のように coupling capacitance の値を定義している。

$$C_{i,j} = \text{coupling_length}(i,j) / (\text{distance}(i,j)^s) \quad (5.1)$$

ここで、 $\text{distance}(i,j)$ とは 2 つの segment i と segment j 間の距離、 $\text{coupling_length}(i,j)$ とは近接している 2 つの segment が並行している長さである。この式より、より近接並行している長さが長いほど coupling capacitance の値が大きくなる。[8] では層間の距離を 1 とし、 s を 1 としている。

また crosstalk の考慮の仕方には以下の 2 種類が考えられている。

- レイアウト全体の coupling capacitance 総量を最小化 [8]
- 各ネット毎に crosstalk 制約を満たす：各ネット毎に許される最大 coupling capacitance の値が与えられており、その値を満たすようにネットの層割り当てや配線を行なう [9]

本研究では coupling capacitance の値 (以降 CT 値と呼ぶ) を (5.1) により扱い、

方法 (i) : crosstalk をレイアウト全体の CT 値の総量を極小化する方法；

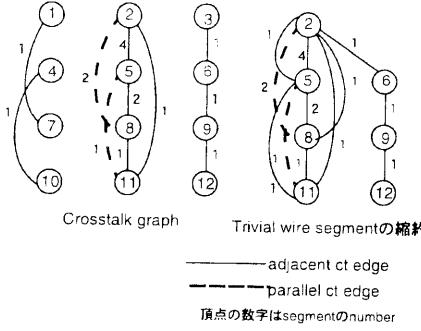


図 4: 図 1 の Crosstalk graph

方法 (ii) : レイアウト内の全てのネットの中で
最大の CT 値を持つネットの CT 値
を極小化する方法;

の 2 種類の方法で考慮する. また, segment 間の距離が 1 のときのみ coupling capacitance が生じることにし, 同層間での隣接した segment の関係を adjacent crosstalk, 異層間で並行に配線されている segment の関係を parallel crosstalk と呼ぶことにする(図 5).

6 Crosstalk の最小化手法

まず, crosstalk を考慮するために対象となるレイアウトから Crosstalk graph を作成する. そして,これを 4.7 で述べた Select, Coloring, Backtrack の実行時に利用して, 方法 1(ビア数を最小化しレイアウト全体の CT 値の総量を極小化)によるレイアウト, または方法 2(最大の CT 値を持つネットの CT 値を極小化)によるレイアウトを求める.

6.1 Crosstalk graph CTG の作成

SCG と同様にレイアウト内の全ての segment を頂点で表す. Adjacent crosstalk に相当する頂点間に辺 (adjacent ct edge) を付加し, (5.1)で計算した CT 値を辺のコストとする. 同様に parallel crosstalk に相当する頂点間に辺 (parallel ct edge) を付加し辺にコストを付加する. この 2 種類の辺をまとめて ct edge という. また trivial wire segment に相当する頂点は除去するのではなく via edge または隣接 via edge で連結している頂点に縮約する. その頂点に接続している cross edge, via edge, 隣接 via edge は trivial wire segment を縮約した頂点間に付加する. Trivial wire segment は 2 種類定義されているが, 縮約の対象としているのは隣接ビアを考慮した SCG の作成の際に, 除去した trivial wire segment と同様のものである. このグラフにおいて adjacent ct edge で連結している頂点同士に割り当てられる層はなるべく異層に, parallel ct edge で連結している頂点同士に割り当てる層は, 1 層と 3 層になることが望ましい.

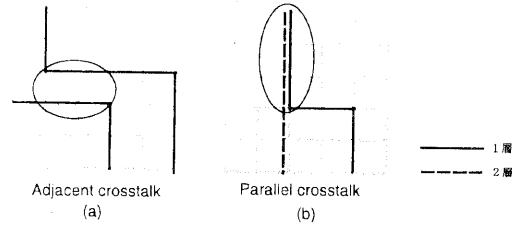


図 5: 2 種類の crosstalk

6.2 Select

4.7.1 の 4. の優先順位をもつ頂点が複数あるとき, それらの頂点に対し以下で述べる余裕度を計算し, その値により決まる優先順位が一番高い頂点 u を選ぶ.

余裕度: 頂点に割り当てることができる層であって, ct edge で連結している頂点には割り当てられていないものの総数である. (つまり, 実際に割り当てもレイアウト全体の CT 値が増加しない層の数である.)

このとき parallel ct edge で連結している頂点 v があれば (v に割り当てられている層に関係なく), v には 2 層が割り当てられていることとし, 且つ u と v は adjacent ct edge で連結していることとする. なぜなら, parallel ct edge で連結している頂点同士のどちらかが, 2 層に割り当てられていると, 残りの頂点にどの層が割り当てられてもレイアウト全体の CT 値が増加するからである.

余裕度の値による優先順位は 1 がもっとも高く, 2, 3, 0 の順とする. 優先順位が最大の頂点が複数あるときは, 4.7.1 の 5. に行く.

6.3 Coloring

$x = 0, 1$ の頂点に層割り当てを行なう際に考慮する. 方法 1 と方法 2 により操作が異なる.

6.3.1 レイアウト全体の CT 値の低減化

$|V_\tau(u)|$ の値が最小の層が複数あれば, そのような層の各々に対して, 以下で定義導入する $value_\tau(u)$ の値を計算し, その値が最小の層を割り当てる.

$value_\tau(u)$: 頂点に層 τ を割り当てるときに増加する CT 値で, 以下の 2 つの操作により計算する.

- 頂点 u と adjacent ct edge で連結していて割り当てられている層が τ のとき :

$$value_\tau(u) \leftarrow value_\tau(u) + (\text{adjacent ct edge のコスト})$$

- 頂点 u と parallel ct edge(そのコストを Δ とする)で連結している頂点で (a) 割り当てられている層が 2 のとき :

$$value_1(u) \leftarrow value_1(u) + \Delta \\ , value_3(u) \leftarrow value_3(u) + \Delta$$

- (b) 割り当てられている層が 1 または 3 のとき :

$$value_2(u) \leftarrow value_2(u) + \Delta$$

- (c) また層が割り当てられていないくて、その頂点に 1(それぞれ 3) 層が割り当て不可能なとき :

$$value_3(u) \leftarrow value_3(u) + \Delta, \\ (\text{または}, value_1(u) \leftarrow value_1(u) + \Delta,)$$

$$value_2(u) \leftarrow value_2(u) + \Delta.$$

なぜなら、この未割り当てる頂点には必ず 3(それぞれ 1) 層か 2 層が割り当てられ、必ず隣接してしまうからである。

$value_\tau(u)$ の値最小の層が複数ある時の層割り当て :

- (1) 頂点 u と via edge で連結していて層が未割り当てる頂点が parallel ct edge を持つなら、それらの中から 1 層, 3 層, 2 層の順に割り当てる。

そうでないなら (2) へ。

- (2) 頂点 u と cross edge で連結していて層が未割り当てる頂点が parallel ct edge を持つ、且つその parallel ct edge と連結している頂点が

- (i) u でなければ、それらの中から 2 層, 1 層,

3 層の順に割り当てる;

- (ii) u ならそれらの中から 1 层, 3 層, 2 層の順に割り当てる。

- (3) 以上の (1), (2) のどれにも該当しなければ、それらの中から 2 層, 1 層, 3 層の順に割り当てる

6.3.2 ネットの最大 CT 値の低減化

$|V_\tau(u)|$ の値が最小の層が複数あれば、そのような層の各々に対して以下で定義導入する $max_net_\tau(u)$ の値を計算し、その値が最小の層を割り当てる。 $max_net_\tau(u)$ は以下 2 つの操作により計算する。

- 頂点 u に層 τ を割り当てるごとに、CT 値が増加するネットを求める。このとき、増加する CT 値の計算方法は $value_\tau(u)$ と同じである。
- 上述したネットの中で増加した後の CT 値が最大のネットの CT 値を $max_net_\tau(u)$ とする。

$max_net_\tau(u)$ の値が最小の層が複数ある時は、6.3.1 と同様の操作を行なう。

6.4 Backtrack

4.7.3 の 4. における優先順位が最小の層が複数あるとき、 $value_\tau(u)$ または $max_net_\tau(u)$ を計算し、その値が最小の層を割り当てる。Backtrack では、隣接 via edge で連結している頂点は cross edge で連結している頂点とみなし、割り当てられている層も変えたが、上記の値を計算する時は、変える前の状態で扱う。

上記の値が最小の層が複数ある時は、それらの中から 2 層, 1 層, 3 層の順に割り当てる。

7 実験の概要と結果

実験は GATE-WAY2000(CPU Pentium/120MHz) 上で行ない、プログラムは C 言語で実装した。入力データは [11] を用い、ネット数 50, 300 のランダムデータ各 100 個ずつに対し、初期レイアウトを作成した。それらのデータに対し、提案手法である隣接ビアを考慮した幅優先探索に基づく手法(ab 法), ab 法と方法 1(レイアウト全体の CT 値の低減化)を合わせた手法(abc_total 法), ab 法と方法 2(ネットの最大 CT 値の低減化)を合わせた手法(abc_net 法), [7] の手法(ここでは HVH 法と呼ぶ)を適用し、得られた結果を比較した。[7] の手法は HVH 型の 3 層配線専用であるが、今回使用した実験データが HVH 型なので比較対象とした。また、[4, 5, 6] の手法は、全てのデータにおいて segment と交差するビアが存在するため比較の対象とならなかった。2, 3 の用語を説明する。

ビア減少率 : 初期レイアウトから減少したビア数の割合であり、与えられたレイアウトの最初のビア数から、各手法適用後に生成されたレイアウト内のビア数を引いた値を、適用前のビア数で割った値である。

TotalCT 値 : 各手法適用後のレイアウト全体の総 CT 値である。

NetCT 値 : 各手法適用後のレイアウト内の全てのネットの中で CT 値が最大のネットの CT 値である。

全ての表はデータ数が 100 である。表 1, 表 2 はネット数 50 のデータ、表 3, 表 4 はネット数 300 のデータを各手法に適用した結果の表である。表 1, 表 3 は各手法から得られた結果を比較した表で、表 2, 表 4 は各手法のビア減少率、totalCT 値、netCT 値と計算時間の平均値である。表 1～表 4 より、今回の実験ではビア減少率に関しては ab 法が最も良い結果が得られた。しかし、abc_net 法もほぼ同様の結果が得られている。CT 値を見てみると、HVH 法には及ばないが abc_net 法は ab 法より若干良い結果が得られた。以上のことから、今回の実験では総合的に見て abc_net 法が最も良い結果を示した。その特徴をまとめると、

- レイアウト全体のビア数の極小化
- レイアウト全体の CT 値の低減化
- 隣接ビアの考慮により、実験した全てのデータで segment と交差しているビアが存在しない等となる。

8 まとめと今後の課題

隣接ビアを考慮し幅優先探索に基づく 3 層配線問題の制約付きビア数最小化の近似解法(ab 法)を提案

表 4: 各データの平均値 (ネット数 300)

表 1: データの比較 (ネット数 50)

	ab 法	abc_total 法	abc_net 法	HVH 法
ビア減少率	*53	20	46	9
netCT 値	22	18	20	*60
totalCT 値	18	*53	15	19
計算時間 (秒)	0	0	0	*100

(値は大きい方が良い)

表 2: 各データの平均値 (ネット数 50)

	ab 法	abc_total 法	abc_net 法	HVH 法
ビア減少率 (%)	*28.6	27.4	28.4	26.6
netCT 値	302	298	299	*270
totalCT 値	2457	*2432	2441	2446
計算時間 (秒)	2.4	3.2	3.3	*0.2

(ビア減少率は大きい方が、CT 値は小さい方が良い)

した。また、ab 法とレイアウト全体の CT 値低減化操作を合わせた手法 (abc_total 法)、ab 法とネットの最大 CT 値低減化操作を合わせた手法 (abc_net 法) を提案した。更に HVH 法との比較実験を行ないその性能評価を行なった。今後の課題としては、

- 更に一般的な crosstalk を考慮した手法
- 幅優先探索の出発点の考慮
- その出発点に割り当てる層の考慮
- 探索方法として、幅優先探索より良い方法の考慮

等が挙げられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、3 層配線作成プログラムを提供頂いた広島工業大学工学部電気工学科大村道郎講師、並びに広島大学工学部第二類若林真一助教授、同小出哲士助手に厚く御礼申し上げます。第二著者渡邊の研究の一部は文部省科学研究費補助金(C)08680371 及び (A)07308028 の援助を受けたことを記して謝意を表する。

表 3: データの比較 (ネット数 300)

	ab 法	abc_total 法	abc_net 法	HVH 法
ビア減少率	*48	10	44	5
netCT 値	2	7	0	*93
totalCT 値	9	*62	11	18
計算時間	0	0	0	*100

(値は大きい方が良い)

	ab 法	abc_total 法	abc_net 法	HVH 法
ビア減少率 (%)	*12.1	11.9	*12.1	11.3
netCT 値	1362	1343	1350	*1142
totalCT 値	67241	*66507	66883	66885
計算時間 (秒)	175	352	343	*7

(ビア減少率は大きい方が、CT 値は小さい方が良い)

References

- [1] R.Y.Pinter, "Optimal Layer Assignment for Interconnect", *Journal of VLSI and Computer Systems*, Vol. 1, No.2, pp. 123-137, 1984.
- [2] X.M.Xiog and Ernest S.Kuh, "The Constrained Via Minimization Problem for PCB and VLSI Design", *25th ACM/IEEE Design Automation Conference*, pp. 573-578, 1988.
- [3] K.C.Chang and H.C.Du, "Layer Assignment Problem for Three-Layer Routing", *IEEE Transactions on Computers*, Vol. 37, No.5, pp. 625-632, 1988.
- [4] K.E.Chang, H.F.Jyu and W.S.Feng, "Constrained via minimization for three-layer routing", *computer-aided design*, Vol. 21, No.6, pp. 346-354, july/august 1989.
- [5] S.C.Fang, K.E.Chang and W.S.Feng, "Via Minimization with Associated Constraints in Three-Layer Routing Problem", *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, pp. 1632-1635, 1990.
- [6] S.C.Fang, K.E.Chang, W.Shiung and S.J.Chan, "Constrained Via Minimization with Practical Considerations for Multi-Layer VLSI/PCB Routing Problems", *28th ACM/IEEE Design Automation Conference*, pp. 60-65, 1991.
- [7] K.Ahn and S.Sahni, Fellow, IEEE, "Constrained Via Minimization", *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, Vol. 12, No.2, pp. 273-282, 1993.
- [8] S.Thakur, K.Y.Chao and D.F.Wong, "An Optimal Layer Assignment Algorithm for Minimizing Crosstalk for Three Layer VHV Channel Routing", *Proceedings of 1995 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, pp. 207-210, 1995.
- [9] T.Miyoshi, S.Wakabayashi, T.Koide and N.yoshida, "An MCM Routing Algorithm Considering Cross-talk", *Proceedings of 1995 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, pp. 211-214, 1995.
- [10] J.Cong and C.L.Liu, "On the k-Layer Planar Sub-set and Topological Via Minimization Problems", *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, Vol. 10, No.8, pp. 972-981, 1991.
- [11] P.Bruell and P.Sun, "A "Greedy" Three Layer Channel Router", *IEEE International Conference on Computer-Aided Design*, pp. 298-300, 1985.