遺伝的アルゴリズムをベースとする クロストークノイズの低減を指向したチャネル配線手法

正 員 吉 川 雅 弥 (立命館大学)

正 員 寺 井 秀 一 (立命館大学)

Channel Routing Technique Based on Genetic Algorithms for Minimum Crosstalk

Yoshikawa Masaya, Member, Terai Hidekazu, Member (Ritsumeikan University)

This paper discusses the novel approach to solve the VLSI channel problem. Routing is one of the major tasks in the physical design of VLSI. Terminals that belong to the same net are connected together subject to a set of routing constraints. With new performance requirements for the design, routing constraints such as crosstalk and RC delay between interconnections are becoming increasingly dominant in submicron regimes. Crosstalk is delay due to coupled capacitance and RC delay is caused resistance and capacitance. Hence, the proposed algorithm based on Genetic Algorithms optimizes both physical constraints (number of tracks) and electrical constraints (crosstalk and RC delay). For selection control, which is one of the genetic operations, new objective functions for minimum crosstalk and RC delay are introduced in addition to the usual objective function based on number of tracks. The experimental results prove that the proposed algorithms is effective for reducing crosstalk and RC delay, as well as number of tracks.

キーワード：遺伝的アルゴリズム，クロストークノイズ，RC 遅延，チャネル配線，ハイブリッド化

1. はじめに

近年，半導体における微細化技術の急速な進歩によって，LSI の高集積化と高機能化が進み，複雑なシステムをワンチップ化することが可能となってきた。このような超微細加工での LSI ではクロストークノイズや RC 遅延による配線問題が顕在化してきた⁽¹⁾。

クロストークノイズとは，近接して平行に走る金属配線の間に生じたカップリング容量（結合容量）によって，隣接する信号の誤動作や遅延が起こることであり，RC 遅延とは，配線における配線抵抗 R と配線容量 C によって引き起こされる信号伝達遅延のことである。

プロセスの微細化に伴い，配線のアスペクト比（LSI チップ上の配線材断面の高さ／幅）が大きくなる一方で，配線ピッチ（最小配線間隔）がより小さくなるため，配線どうしの隣接によるカップリング容量は大きくなる。このため，信号配線が隣接することによるクロストークノイズを考慮すると，ノイズが閾値を超えない許容最大平行配線長はプロセスの微細化とともに短くなっていく。

そこで本論文では，クロストークノイズと RC 遅延の低減を指向した遺伝的アルゴリズムをベースとする新しいチャネル配線手法を提案する。遺伝的アルゴリズム（Genetic

Algorithm：以下，「GA」と略記する）とは，生物の進化機構にアイデアを得て Holland⁽²⁾により発案されたアルゴリズムであり，確率的探索・学習・最適化の一手法と考えられる。特に，組み合わせ最適化問題に対して強力な探索能力を有し，スケジューリング問題や組み合わせ問題などを始め，様々な分野での適用について研究がなされている^{(3)～(13)}。

GA においては，予め決められた数の個体の集合を常に保持し，選択・交叉・突然変異という 3 つの遺伝的オペレーションを適用することにより世代交代を繰り返し，その集団を進化させ解を導く。

GA を LSI のレイアウト問題に適用した報告として，フロアプラン⁽³⁾やセル配置問題⁽⁴⁾に関する報告がある。

チャネル配線問題に適用したものとしては，予め配線トラック数を与えて，その中で，水平制約 上下制約を充足する配線パターンを探索する手法^{(5)～(10)}や 2 層配線を対象に，各層における配線パターンを 2 次元配列で表現し，配線トラック数が最小になる配線を探索する手法^{(11)～(13)}が報告されている。

また，クロストークノイズの低減に関しては，配線の後処理として，既配線を対象に引き剥がし再配線による配線改善手法が報告⁽¹⁴⁾されている。

本論文で展開する配線手法は，GA をベースとして 2 種

類のヒューリスティックな手法を組み込み、クロストークノイズと RC 遅延の低減を目的に、互いに平行する配線の長さを抑制した配線手法であり、このようなアプローチによるチャンネル配線の発表はこれまでみあたらない。

2. チャンネル配線

チャンネルとは、上下2組の端子列で囲まれた LSI 内部の障害物のない矩形の配線領域のことであり、端子列に平行な配線路（以後、トラックと呼ぶ）に割り当てられる水平線分を幹線と呼び、幹線と端子を結ぶ垂直線分を支線と呼ぶ。一般にチャンネル配線では、図1に示すように支線には第1層目を、幹線には第2層目を、支線と幹線の接続にはビア（1層目と2層目を接続する開孔部）を用いる。また、図1でネット番号がない端子（白抜きの端子）は、未使用端子を表す。

チャンネル領域での配線を考えた場合、幹線どうしが重複しないための水平制約および支線どうしが重複しないための上下制約が生じる。これら2つの制約を満足した上で、配線トラック数を最小にするような幹線の配置を求めることがチャンネル配線問題である。

ここで、ネット（同じ信号で接続される端子の集合）数を k とした場合のネット集合を

$$Net = \{n_1, \dots, n_k\}$$

とすると、幹線が重複しないための制約を表現するグラフとして、水平制約グラフ $G_H = (Net, E_H)$, $e_H = (n_i, n_j)$ を用いる。枝 (n_i, n_j) は無向枝であり、ネット n_i とネット n_j の幹線が同じトラックに割り当てられた場合に幹線重複が起こることを示している。図1の場合の水平制約グラフを図2の G_H に示す。このグラフでは頂点1と頂点4との間に枝が存在する。これはネット1の幹線をネット4の幹線と同じトラックに割り当てると、幹線重複が生じることを示している。

また、支線が重複しないための制約を表現するグラフとして、上下制約グラフ $G_V = (Net, E_V)$, $e_V = (n_l, n_m)$ を用いる。枝 (n_l, n_m) は有向枝であり、支線が重複しないためにはネット n_l の幹線がネット n_m の幹線より上のトラックに割り当てられていなければならないことを示す。図1の場合での上下制約グラフは図3の G_V のように表すことができる。このグラフでは頂点6から頂点1に向かって枝が存在する。支線が重複しないためにはネット1の幹線をネット6の幹線より上のトラックに割り当てなければならないことを示している。

さらにこの上下制約に関して、図4に示すような上下制約グラフの中に有向閉路（サイクル列）が存在する場合がある。このようなサイクル列があると幹線割り当て順序がループをなし、各ネットを1本の幹線で配線することができなくなる。これを回避するためには、図5に示すように、幹線を2つ以上の部分幹線に分割し、グラフにサイクル列を生じないようにする必要がある。

3. GA をベースとするチャンネル配線の処理概要

本論文のチャンネル配線での処理は、図6に示すように、「Basic 配線」と「Extended 配線」の2ステップで構成し、それぞれにおいて基本アルゴリズムに GA を適用する。

まず Basic 配線では、図7(1)に示すように1つのネットに1つの幹線を割り当てる。ここでは、クロストークノイズへの影響の大きいネット（ネットの左端の端子と右端の端子の距離が長い）の配線は行わないものとする。なぜなら、このようなネットは分割により、平行する配線の長さの短縮を期待できるからである。

そこで、Basic 配線で配線対象外とするネットの選択基準は、端子列の長さに対する、各ネットの左端の端子と右端の端子の距離（詳細は後述）とした。すなわち、左端の

図1 チャンネル配線問題

Fig. 1. Example of channel routing problem

図2 水平制約グラフ G_H

Fig. 2. Horizontal constraint graph G_H

図3 上下制約グラフ G_V

Fig. 3. Vertical constraint graph G_V

図4 幹線のループ

Fig. 4. Loop of horizontal

図5 ループの分断

Fig. 5. Division of loop segment

端子と右端の端子の距離が閾値以上のネットは、Basic 配線で配線を行わないものとする。また、サイクル列があるネットも Basic 配線の対象外とした。

詳しくは 3.4 節で説明するが、Basic 配線では 2 種類のヒューリスティックな手法を GA の進化ループの中に組み込んだハイブリッド探索を行う。

次に、Extended 配線では図 7 (2) に示すように Basic 配線で配線を行わなかったネットに対して、幹線を分割して配線を行う。すなわち、1 つのネットに 2 つ以上の幹線を用いることになる。

〈3・1〉 Basic 配線におけるコーディング 本手法では Basic 配線におけるコーディングを図 8 のように行った。

図 6 配線の処理フロー
Fig. 6. Routing flow

図 7 配線手法
Fig. 7. Routing technique

図 8 は図 1 の配線パターンを表したもので、遺伝子座にネット番号を、遺伝子にトラック番号を対応させる。すなわち、ネット番号順にトラック番号を保存する形で個体を表現する。図 8 では 'ネット 1' と 'ネット 2' がトラック 1 へ 'ネット 3' がトラック 3 へと割り当てられている。

〈3・2〉 Basic 配線における選択オペレーション GA においては次世代での集団形成メンバーとなる優良個体を継続させることが重要である。これは個体の選択を制御する評価関数の設定に大きく依存する。

これまでに発表されているチャネル配線問題に対するこの選択制御関数については水平・上下の制約条件のもとで、配線トラック数を最小にする目的関数がほとんどである (5) - (10)。

これに対し、本手法では配線トラック数の削減とクロストークノイズおよび RC 遅延の低減を目標に、以下の 5 つの評価 (1), (2), (3), (4), (5) を組み込んだ新しい評価関数を考案した。ここで t は各個体 (1 つの個体は 1 つの配線結果) とする。

(1) 水平制約 上下制約に対する違反数: $f(t)$

$f(t)$ は、水平制約および上下制約を違反しているネットの総数とする。また、水平制約および上下制約を違反しているネットは未配線ネットである。

(2) 配線トラック数: $g(t)$

$g(t)$ は、配線するために使用したトラックの総数で、未配線ネットは、どのトラックにも割り当てられていないものとして扱う。トラック数の増加はチップ面積の増加につながるため、 $g(t)$ は小さい方が望ましい配線となる。

(3) 多様性の指標: $h(t)$

$h(t)$ は、集団としての解の多様性を維持するために用いる。提案手法ではエリート保存戦略を採用する。 $h(t)$ は、個体 t の遺伝子がエリート個体とどの程度異なるかを表す指標である。具体的には各遺伝子座の遺伝子が、エリート個体と異なれば '+1'、同じであれば '+0' とし、すべての遺伝子座について計算し、その積算値を $h(t)$ とする。後述の優先型評価方式において、積算値をそのまま用いると淘汰圧力が強いいため、実際には、 $h(t)/\alpha$ とスケールを施したもの (α はチューニングパラメータ) を用いた。ここで、 $h(t)/\alpha$ が大きい個体を優先的に選択することによって、 $f(t)$, $g(t)$ の評価が同じ (後述の優先順位) 個体であっても、より多様な遺伝子型の個体、すなわち多彩な配線パターンを集団中に保持することができる。

(4) 最大平行配線長: $CTD(t)$

クロストークノイズを低減するためには、平行配線を抑制することが有効である。しかし全ての信号に対して、平行配線の抑制を行うと配線密度が低下する。そこで進化の

Net number	1	2	3	4	5	6
Track number	{ 1, 1, 3, 2, 4, 4 }					

図 8 Basic 配線におけるコーディング
Fig. 8. Example of coding for basic routing

各世代の各個体において、最も長い平行配線（最もクロストークノイズへの影響が大きい）の抑制を考える。

ここでチャネル配線での平行配線は、幹線に対する平行配線と支線に対する平行配線の2つの場合がある。隣接する幹線における最大平行配線長を $i_H(t)$ とすると図9の場合、 $i_H(t)$ は、(1) が7で、(2) が3となる。

また、隣接する支線における最大平行配線長を $i_V(t)$ とすると、図10の場合、 $i_V(t)$ は、(1) が4で、(2) が2となる。

そこで、クロストークノイズへの影響の度合いを表す指標として $i_H(t)$ と $i_V(t)$ の和 (CTD : *CrossTalkDegree*) を用いる。互いに平行する配線の長さを抑制するために、 $CTD(t)$ は小さい方が望ましい配線となる。

(5) 最大配線経路: $MNL(t)$

微細化が進むと、配線の断面積が小さくなるため配線抵抗は増加し、その結果、信号伝達遅延は増大する。そのため、全遅延の中でゲート遅延（回路素子の遅延）よりも信号伝達遅延（RC遅延）が支配的になってきている。

しかし、すべての配線の遅延を抑えることは現実的に難しいため、ここでは進化の各世代の各個体において、すべての配線経路の中で最大配線経路（最もRC遅延が大きい）を短くすることを考える。具体的に図11を用いて説明する。図11の場合、(1)・(2)ともに最も配線経路が長いネットは3である。ここで、各端子間の距離と各トラック間の距離をそれぞれ1とすると、(1)・(2)とも幹線の長さは同じであるが、支線の長さの合計がそれぞれ7と5である。そのためネット3の配線長としては(1)が15で(2)が13となる。そこで、個体 t における最大配線経路 (MNL : *MaximumNetLength*) を $MNL(t)$ とする。 $MNL(t)$ は小さい方が望ましい配線

図9 幹線での最大平行配線長

Fig. 9. Maximum parallel length at horizontal segment

図10 支線での最大平行配線長

Fig. 10. Maximum parallel length at vertical segment

となる。

本手法で用いる評価関数は、互いに平行する配線の長さとして最大配線経路の短縮を目的としたもので、各目的関数に優先順位をつけ、その優先順位にしたがって解を絞り込んでいく優先型評価方式を採用した。優先度は、1) $f(t)$, 2) $g(t)$, 3) $h(t)$, 4) $CTD(t)$, 5) $MNL(t)$ とした。

すなわち、 $f(t)$ のみによって順位を決め、 $f(t)$ が同じものの（制約違反数が同じ）については、 $g(t)$ により、さらに同じものには、 $h(t)$ によりというように解を求める。

したがって、本手法で用いた優先型評価方式は、進化の初期の段階において、配線率を100%にすることと配線トラック数を削減することに重点を置いた探索を行う。ここで、集団としての多様性を維持する、すなわち多彩な配線パターンを維持するために目的関数 $h(t)$ が働く。そして、進化が進む（集団の各個体の配線率が100%で、配線トラック数が同程度になった状態）につれて、目的関数 $CTD(t)$ と $MNL(t)$ によって、最大平行配線長や最大配線経路の小さな個体が優先的に選択される。

このように最大平行配線長と最大配線経路を抑制することによって、結果としてクロストークノイズとRC遅延が低減されることになる。

〈3・3〉 Basic 配線における交叉・突然変異オペレーション
質の良い解を得るためには親から良い形質を継承することと、できるだけ広い領域を探索することが必要である。まず、Basic 配線で用いる交叉手法を決めるためにどのような形質を遺伝するのが望ましいかを考える。本論文でのコーディングに従えば、ネット番号（遺伝子座）とトラック番号（遺伝子）の対に意味があり、遺伝子の順序関係（例えば、図8における1, 1, 3, 2...という順序）は本質的

図 11 最大配線経路

Fig. 11. Example of maximum net length

でない。また交叉法の中で、1点交叉や2点交叉は、遺伝子の順序（順列）が保存されやすい傾向がある。一方、一様交叉は、遺伝子と遺伝子座の対を世代間で保持することと探索領域の広域化という効果が期待できる。

そこで、交叉オペレーションとしては一様交叉を適用することとした。また、突然変異オペレーションとしては、任意の遺伝子座の遺伝子を対立遺伝子（他のトラック番号）に変える1点突然変異を用いた。

〈3・4〉ハイブリッド化 本章で展開するチャネル配線法のベースとなる各遺伝オペレーションについては、3.2節、3.3節で説明した。しかし、これらの遺伝オペレーションでは、上下制約違反に対する回避能力、及び水平トラックへの幹線の詰め込み能力が不十分である。その根拠を以下に考察する。

まず、上下制約違反に対する回避能力について図12を用いて考える。

図12を上下制約違反の例として解釈するために、個体数を n 、制約違反している個体を *Individual 1*、違反しているネットを '2' と '4'、上下制約としてはネット2の幹線がネット4の幹線より上のトラックに割り当てなければならない（トラック番号ではネット2がネット4より小さい）とする。ここで、上下制約を違反しているため、 $p_1 \geq q_1$ となっている。少なくとも着目した上下制約違反を回避するためには、

$$p_l \{l|1, \dots, n\} < q_m \{m|1, \dots, n\} \dots \dots \dots (1)$$

となる (l, m) を交叉 突然変異で見つけ出さなければならない。

一方、水平制約違反は、少なくとも着目した違反に関して、交叉 突然変異によって違反しているどちらか一方の

図 12 各個体の表現型

Fig. 12. Genotype of each individual

ネットを別のトラックに再割り当てを行えば、違反を回避できる可能性がある。これは同じ図12を、*Individual 1* でネットを '2' と '4' が水平制約違反していると解釈してみると、この場合、 $p_1 = q_1$ であり、この違反を解消するためには、

$$p_1 \neq q_m \{m|2, \dots, n\} \dots \dots \dots (2)$$

または

$$q_1 \neq p_m \{m|2, \dots, n\} \dots \dots \dots (3)$$

となる m が交叉 突然変異で見つけ出せればよい。

式(1)と式(2)(3)を比較するとわかるように、上下制約は水平制約に比べて厳しい制約であり、3.3節で示した交叉 突然変異では、すべての上下制約を充足する解を見つけて出すことは難しい。

次に、水平トラックへの幹線の詰め込み能力について考える。通常、ある配線パターンにおいて、水平制約 上下制約を充足する範囲でトラック数を削減するには、特定のネットを特定のトラックに再割り当てを行わなければならない。

しかし、GAは交叉演算を中心に新しい解を生成するため、このような系統的な探索というのは苦手である。

詳しい結果は4.2節で示すが、このような上下制約違反に対する回避能力が低いことは未配線ネットの増加を、水平トラックへの幹線の詰め込み能力が低いことは配線トラック数の増加をそれぞれ引き起す。

そこで、処理の前段として3.4.1節で示す Swap 法と、後段として3.4.2節で示すコンパクション法と呼ぶ2つのヒューリスティックな手法を組んだハイブリッド探索を行うことによって、これらの問題を回避することとした。

〈3・4・1〉Swap法 上下制約違反ネット（箇所）を削減するために、端子番号の小さい順に、制約違反ネット（支線が重複している2つのネット）に対して、それぞれが割り当てられているトラックを入れ換える手法を進化ループに組み込む。これをここでは、Swap 法と呼ぶことにする。

図13を例に処理手順を述べる。まず、端子番号の小さい順に違反箇所を探す。図13の場合、端子番号が2の位置で、ネット8とネット2の支線が重複している。次に、それぞれが割り当てられているトラック（ネット8はトラック3、ネット2はトラック2）を入れ換える。この入れ換えを用

ることによって、別の端子位置で、新たな制約違反が起きる可能性があるが、少なくとも端子2の位置での上下制約違反は解消されることになる。

このような入れ変えを上下制約の違反部分について、端子番号の小さい順に行うことで、上下制約の違反数が減少する、もしくは、少なくとも同じになることが期待できる。Swap 法によるハイブリッド探索は、進化（探索）の途中、すべての上下制約がなくなった時点で打ち切る。

〈3・4・2〉コンパクション法 配線トラック数を削減するために、すべてのネットに対し、ネット番号の小さい順に水平制約 上下制約を充足する範囲で、現在割り当てられているトラックより上のトラック（トラック番号のより小さいトラック）に再割り当てを行う手法を進化ループに組み込む。これをここでは、コンパクション法と呼ぶことにする。

図14を用いて説明する。コンパクション法はすべてのネットに対して、ネット番号の小さい順にトラックの再割り当てを行うため、図14の場合は以下のような動作になる。

〔ネット1〕 トラック番号1に幹線が割り当てられているため、それ以上、上のトラック（トラック番号のより小さいトラック）に再割り当てすることはできない。

〔ネット2〕 トラック番号1に再割り当てを行うと、ネット1と幹線 支線とも重複するため、再割り当てができない。

〔ネット3〕 トラック番号2からトラック番号1に再割り当てを行う。

〔ネット4〕 トラック番号1に幹線が割り当てられているため、それ以上、上のトラックに再割り当てすることはできない。

〔ネット5〕 トラック番号2からトラック番号1に再割り当てを行う。

〔ネット6〕 トラック番号1へ再割り当てを行うとネット4と幹線が重複する。次にトラック番号が小さい2に再割り当てを行う。

このように図14の場合、コンパクション法により、全体として配線トラック数が3から2へと削減される。

図14 コンパクション法
Fig. 14. Compaction method

ただし、コンパクション法は Basic 配線の対象としたすべてのネットが配線されている個体に対してのみ適用する。なぜならば、水平制約違反 上下制約違反がある状態で、コンパクション法を適用すると、各トラックにおいて余分なスペースがなくなり、水平制約 上下制約ともに、より厳しくなるからである。

〈3・5〉Extended 配線におけるコーディング Extended 配線は、Basic 配線で配線を行わなかったネット（クロストークノイズへの影響が大きいネットとサイクル列を生じてるネット）に対して適用する。図15を用いて、Extended 配線のコーディング方法を説明する。まず、Basic 配線で使用した全てのトラックの間に新たなトラックを追加する。図15(1)の場合、点線で示したトラックが新たに追加したトラックである。

次に、Basic 配線の配線対象外としたネットで、番号の小さい順（図15では1つ）に遺伝子座を昇順にそれぞれを対応させる。Extended 配線では、幹線を分割し、複数のトラックに割り当てを行うため、遺伝子に「幹線の分割位置（端子番号で表現する）」と「分割した幹線の割り当てトラック番号」をそれぞれ与える。ここで、分割位置を表す端子番号の値は、端子列の左端の端子番号と右端の端子番号の間とした。

また、対応させる順序は、端子番号の小さいほうから、トラック番号 分割位置 トラック番号 分割位置 トラック番号とする。したがって、Extended 配線では図15(2)のようなコーディングになる。図15(2)は、図15(1)の配線パターンを表したものである。

本手法では、遺伝子長を固定としているため、予め分割数を決めておく必要がある。本手法においては、この分割数は端子列の長さに応じて可変とした。ただし、分割した幹線において、連続した幹線が同じトラックに割り当てられた場合には、分割を行っていないものとして扱う。

図13 Swap 法
Fig. 13. Swap method

図 15 Extended 配線におけるコーディング
Fig. 15. Example of coding for extended routing

〈3・6〉 Extended 配線における遺伝オペレーション
Extended 配線での選択オペレーションは Basic 配線と同じものを用いる。また、交叉に関して、Basic 配線では一様交叉を用いたが、Extended 配線でこれを用いると、図 16 に示すような個体間での交叉では、交叉によって生成された子個体が、連続した分割位置で同一の端子番号を持つ個体になる可能性がある。

図 16 の場合、Net t に関して、個体 m と n は、異なった分割位置に同一の端子番号 3 (個体 m は 2 番目の分割位置、個体 n は 1 番目の分割位置) があるため、これらの個体間での交叉によって生成された子個体が、1 番目 2 番目の分割位置ともに端子番号 3 になる可能性がある。

本論文でのコーディングでは、分割位置を端子番号で表現しているため、連続した分割位置に同一の端子番号を持つものは、配線パターンとして意味をなさない致死遺伝子となる。

そこで、Extended 配線ではこのような致死遺伝子を抑制する交叉法を用いた。この交叉法では幹線と支線とを分けて考える。まず幹線については、Basic 配線と同様の一様交叉を行う。次に、支線については、図 17 を例に説明する。ただし、図 17 は、親個体を図 16 の 2 つとし、Net t の場合の交叉とする。その他のネットについても同様の処理を行う。

- Step1:** Mask を発生させ、一様交叉を行う。
Step2: Step1 で生成した子個体において、連続した分割位置で同一の端子番号の部分を探す。
Step3: Step2 で連続した分割位置で同一の端子番号の部分があった場合、遺伝子座の大きい分割位置の端子番号をランダムに変更する。
- 突然変異についても交叉同様に幹線と支線とを分けて考える。幹線に対する突然変異では、Basic 配線同様に割り

図 16 交叉を行う親個体
Fig. 16. Examples of parents for crossover

図 17 交叉手法
Fig. 17. Example of crossover

当てられたトラックをランダムに変更する突然変異を用いる。ただし、変更したトラックに既配線がある場合 (Basic 配線の幹線があるトラック) は、既配線がないトラックになるまで再割り当てを繰り返す。

支線に対する突然変異では、任意の分割位置の端子番号を変更する突然変異を用いる。ただし、前述の交叉同様、致死遺伝子を抑制するために、隣接した分割位置の端子番号と同一の端子番号への変更は禁止とした。

4. 実験評価

〈4・1〉 実験要領 本論文で提案した手法の有効性を確認するために、広く使われている文献 (16) のベンチマークデータを用いて、以下に示す実行条件のもとで比較実験を行った。各実験での実施項目を表 1 に示す。

また、使用したベンチマークデータの諸元を表 2 に示す。文献 (16) では、チャネルの上辺下辺の対向する端子を結ぶ線を横切る幹線の本数を各対向端子ペアごとにカウントしたものを Local density とし、Local density の最大値を Maximum density と定義している。本論文でも表 2 の各データにおける Maximum density は、文献 (16) の Maximum density と同じ定義を用いるものとする。

- 〔実験 1〕 本論文で提唱する配線手法。GACR-1 (Genetic Algorithm's Channel Router 1) と呼ぶ。
〔実験 2〕 Basic 配線におけるハイブリッド化で Swap 法とコンパクション法を適用する配線手法。Extended 配線は行わない。GACR-2 と呼ぶ。
〔実験 3〕 Basic 配線におけるハイブリッド化で Swap 法のみを適用する配線手法。Extended 配線は行わない。GACR-3 と呼ぶ。
〔実験 4〕 Basic 配線において、非ハイブリッド配線手法。Extended 配線は行わない。GACR-4 と呼ぶ。
- ここで、比較対象として文献 (16) の配線手法を用い

表 1 対応表
Table 1. Corresponding table

	GACR-1	GACR-2	GACR-3	GACR-4
experiment No.	1	2	3	4
Basic	○	○	○	○
Swap	○	○	○	-
Compaction	○	○	-	-
Extended	○			

た。文献(16)で幹線の分割を行う配線手法を YKCR-1 (Yoshimura and Kuh's Channel Router 1) とし、幹線の分割を行わない配線手法を YKCR-2 とした。

GACR-1・GACR-2・GACR-3・GACR-4のすべてにおいて、突然変異率を 0.01、ジェネレーションギャップが 0.7 の連続世代モデル、トーナメントサイズ (1 回のトーナメントで選出される個体数) が 4 のトーナメント戦略およびエリート保存戦略を採用した。また、 $h(t)$ におけるチューニングパラメータ α は 3 とした。文献(16)に示されている各ベンチマークデータでの個体数・終了世代数は、それぞれ ex.1 では 100・100、ex.3a では 300・300、ex.5 では、500・500、dif.ex では、1000 500 とした。各パラメータについては処理時間と解の精度の点から最も有効な値を求め、設定した。また、実行プラットフォームには、Memory-128MByte, CPU-PentiumIII800MHz を使用した。

〔4・2〕実験結果と考察：その 1 まず、ハイブリッド化の有効性を検証するために、実験 2～4 での比較および YKCR-2 との比較を行った。各ベンチマークデータに対する配線トラック数と処理時間による比較を表 3 と表 4 にそれぞれ示す。

表 3 より GACR-2 では、配線トラック数に関して、ex.1 ex.3a では文献(16)での配線トラック数で配線することができた。ex.5・dif.ex では文献(16)での配線トラック数に比べて、1 つ多いトラック数となった。一方、GACR-4 では dif.ex を配線することができなかった。これは、処理を打ちきった世代の中で、3.4 節で述べた上下制約違反を回避するための遺伝子型 (配線パターン) を交叉 突然変異だけでは見つけ出せなかったことによるものと考えられる。GACR-3 では配線することはできたが、GACR-2 に比べると配線トラック数が多い。このことより、上下制約違反の削減を目的とした Swap 法および配線トラック数の削減を目的としたコンパクション法の各ハイブリッド化が有効に働いたと考えられる。

また、表 4 より、GACR-2・GACR-3・GACR-4 とともに配線規模が大きくなる (ex.1 → dif.ex) につれて、処理時間も増大している。これは、個体数・世代数ともに大きくなっていることによるものと考えられる。GACR-3 と GACR-4 を比べた場合の処理時間の増分よりも GACR-2 と GACR-3 を比べた場合の処理時間の増分が大きいことは、Swap 法よりもコンパクション法が計算量の多い処理のためと考えられる。

表 2 ベンチマークデータ

Table 2. Benchmark data

Data	Number of nets	Maximum density
Example 1 (ex.1)	21	12
Example 3a (ex.3a)	45	15
Example 5 (ex.5)	62	20
Difficult example (dif.ex)	72	19

表 3 配線トラック数による比較

Table 3. Comparison of number of tracks

	YKCR-2	GACR-2	GACR-3	GACR-4
ex.1	12	12	12	13
ex.3a	15	15	17	17
ex.5	20	21	23	23
dif.ex	28	29	31	-

表 4 処理時間による比較

Table 4. Comparison of processing time (sec)

	GACR-2	GACR-3	GACR-4
ex.1	1	1	1
ex.3a	33	20	16
ex.5	114	78	68
dif.ex	387	222	-

図 18 配線率とトラック数の世代との関係

Fig.18. Relationships ratio of connection and number of tracks with generation

ここで、dif.ex における GACR-2 と GACR-3 と GACR-4 の配線率の収束の様子と、トラック数の収束の様子を図 18 に示す。図 18 より、GACR-2 と GACR-3 は 20 世代程度までに配線率が 100 % になっている。また、GACR-2 と GACR-3 は初期世代から 20 世代程度まで配線トラック数が増加し、その後トラック数が減少している。このことは優先型評価方式によるものと考えられる。すなわち、配線率を 100 % にするためにトラック数を増加させ、すべてのネットが配線できた後に配線トラック数の削減を行っている。また、GACR-4 では、未配線ネットがあるため、配線トラック数が少なくなっている。

〈4・3〉 実験結果と考察：その2 次に、クロストークノイズとRC遅延の低減を指向した評価関数の有効性を検証するために実験2とYKCR-2との比較考察を行う。YKCR-2とGACR-2の最大平行配線長と最大配線経路の比較を表5に示す。ここで、表3より、YKCR-2とGACR-2を配線トラック数で比較すると、ex.5とdif.exでは、YKCR-2がGACR-2に比べてどちらも配線トラック数が1つ少ない。

一方、表5より最大平行配線長（幹線と支線の和）と最大配線経路に関しては、dif.exでの最大配線経路以外、YKCR-2に比べてGACR-2はすべてのベンチマークデータで改善されている。また、最大平行配線長に関して幹線と支線での改善率を比べると、特にex.1とex.5とdif.exで、クロストークノイズの低減に最も関係のある幹線の平行配線長が大幅に改善されている。

ここで、dif.exでのYKCR-2とGACR-2の幹線における平行配線の状態を図19に示す。図19は、横軸に平行配線の長さを、縦軸にその個数を取ったものである。図19より、YKCR-2に比べてGACR-2は、最大平行配線長だけでなく、平行配線が全体的に減少したと読み取ることができる。以上のことより、クロストークノイズとRC遅延の低減を指向した評価関数が有効に働いたと考えられる。一方、dif.exでの最大配線経路が約1.5%増加したことは、YKCR-2に比べてGACR-2は配線トラック数が1つ多いことに起因すると考えられる。

ここで図20に、dif.exでのGACR-2の優先型評価方式において、個体の選択に使用された各目的関数の割合の推移を示す。図20からもわかるように、初期の頃の世代では、 $f(t)$ $g(t)$ の評価によって個体が選択され、70世代~100世代にかけて $CTD(t)$ ・ $MNL(t)$ の評価によって選択される個体が増えてくる。また、図中の *other*とは、すべての評価項目（ $f(t)$, $g(t)$, $h(t)$, $CTD(t)$, $MNL(t)$ ）が同一の評価の場合を示している。この場合、トーナメントにおける選択はランダムに行った。

したがって、110世代程度で解の近傍に到達したことになる。このことは、図18からも読み取ること（トラック数も100世代程度経過してから29に収束している）ができる。

〈4・4〉 実験結果と考察：その3 最後に、Extended配線の有効性を検証するために実験1とYKCR-1のdif.exでの比較を表6に示す。ただし、GACR-1では分割数を3、

表5 最大平行配線長（幹線 支線）と最大配線経路による比較

Table 5. Comparison of maximum parallel length (horizontal and vertical) and maximum net length

		ex.1	ex.3a	ex.5	dif.ex
Horizontal segment	YKCR-2	30	42	46	86
	GACR-2	20	42	32	68
Vertical segment	YKCR-2	9	11	18	25
	GACR-2	8	10	18	25
Maximum net length	YKCR-2	59	92	115	350
	GACR-2	53	91	112	356

図19 幹線における並行配線の状態
Fig.19. State of parallel segment on horizontal segment

図20 各目的関数の使用割合の推移
Fig.20. Change of ratio of occupation on each objective function

各ネットにおいて左端の端子と右端の端子の距離が端子列の3/4以下のネットについてはBasic配線を、それ以上のネットについてはExtended配線をそれぞれ適用した。

表6より、YKCR-1に比べてGACR-1が幹線での最大平行配線長が約18%改善されている。ここで、dif.exでのYKCR-1とGACR-1の幹線における平行配線の状態を図21に示す。図21は、横軸に平行配線の長さを、縦軸にその個数を取ったものである。図21より、YKCR-1に比べてGACR-1は、最大平行配線長だけでなく、平行配線が全体的に減少したと読み取ることができる。

また、YKCR-1が20トラック（Maximum density + 1）で配線しているのに比べ、GACR-1は24トラック使用した。そのため、支線での最大平行配線長と最大配線経路が増加した。これは、Extended配線で配線トラック数を削減するためのハイブリッド探索を行っていないためと考えられる。配線トラック数を削減するためには、Extended配線での分割した幹線（部分幹線）をBasic配線で使用したトラックに割り当てればよい。しかし、水平制約 上下制約を充足した上で、配線トラック数を削減するためには、部分幹線を割り当てるトラック（トラック番号）だけではなく、部分幹線の長さ（分割位置）も考慮する必要がある。

表 6 YKCR-1 と GACR-1 の性能比較
Table 6. Comparison between YKCR-1 and GACR-1

	YKCR-1	GACR-1
Number of tracks	20	24
Horizontal segment	79	65
Vertical segment	17	20
Maximum net length	239	259
Processing time (sec)	-	318

図 21 幹線における並行配線の状態
Fig. 21. State of parallel segment on horizontal segment

そこで、Extended 配線における配線トラック数を削減するためのハイブリッド探索の検討を今後行う予定である。

最後に、GACR-1 による Difficult example の配線結果を図 22 に示す。

5. む す び

本論文ではクロストークノイズと RC 遅延の低減を指向した GA をベースとするチャネル配線手法を提案し、ベンチマークデータによる比較実験を行った。提案手法では、上下制約違反の削減を目的とした Swap 法と配線トラック数の削減を目的としたコンパクション法の 2 種類のヒューリスティックな手法を組み込んだハイブリッド探索を実現するとともに、評価関数に配線トラック数の削減だけでなく、平行配線長の抑制や最大配線経路の短縮を複合的に用いる

ことによって、幹線を分割しない配線モデルにおいては、クロストークノイズの低減に最も関係のある幹線の平行配線長を大幅に改善することができた。

一方、幹線を分割した配線モデルでは、YKCR-1 は dif.ex において 20 トラックで配線しているに対し、GACR-1 は、24 トラックを必要とした。また、文献 (18), (19) では同じ問題を 19 トラックで配線している。これらと比較して、本論文は、配線トラック数の点で不十分であり、今後 4.4 節で述べた Extended 配線での配線トラック数を削減するためのハイブリッド探索法の検討をさらに進めていく予定である。

(平成 13 年 2 月 20 日受付, 同 13 年 6 月 1 日再受付)

文 献

- (1) 半導体技術ロードマップ委員会編:「半導体技術動向に関する調査報告書—半導体産業発展のための技術指針」, 通商産業省, 平成 11 年度高度技術集約型産業等研究開発調査 (2000.3)
- (2) J.Holland:「Adaptation in Natural Artificial Systems」, the University of Michigan Press (Second edition: MIT Press) (1992)
- (3) Koichi Hatta, Shinichi Wakabayashi and Tetsushi Koide:「Solving the rectangular packing problem by an adaptive GA based on sequence-pair」, Proc. of Asia and South Pacific Design Automation Conference, 6D.10, pp. 181-184 (1999)
- (4) 吉川 雅弥, 寺井 秀一:「遺伝的アルゴリズムをベースとする LSI セルの並列配置手法」, 電気学会論文誌 C, Vol.120-C, No.11, pp. 1528-1538 (2000.11)
- (5) B.B.Parahlada Rao, L.M.Patnaik and R.C.Hansdah:「A Genetic Algorithms for Channel Routing」, Proc.1st IEEE.Int. Conf. Evolutionary Computation, pp. 97-103 (1994)
- (6) B.B.Parahlada Rao, L.M.Patnaik and R.C.Hansdah:「An Extended Evolutionary Programming Algorithms for VLSI Channel Routing」, Evolutionary Programming IV, Proc.4th Annu. Conf. Evolutionary Programming, J.R.McDonnell, R.G. Reynolds and D.B.Fogel, Eds. Cambridge, MA, MIT Press (1995)
- (7) B.B.Parahlada Rao and R.C.Hansdah:「Extend Distributed genetic Algorithms for channel routing」, Proc. IEEE Symp. Parallel and Distributed Proc., pp. 726-733 (1993)
- (8) 谷口 成広, 劉 興鈞, 坂本 明雄, 島本 隆:「遺伝的アルゴリズムを用いたチャネル配線の試み」, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J76-A, No.9, pp. 1376-1379 (1993)
- (9) A.T.Rahmani and N.Ono:「A Genetic Algorithms for Channel Routing problem」, Proc.5th Int. Conf. Genetic Algorithms, pp. 494-498 (1993)
- (10) 吉川 雅弥, 秋月 龍胆, 高島郁昌, 寺井 秀一:「遺伝的アルゴリズムを用いた階層化配線手法の一考察」, 電気関係学会関西支部連合大

図 22 GACR-1 による Difficult example の配線結果
Fig. 22. Result of Difficult example by GACR-1

- 会論文集, G289 (2000)
- (11) J.Lineig and K.Thlasiraman: 「A Genetic Algorithm for Channel Routing in VLSI Circuits」, Evolutionary Computation, Vol.1, No.4, pp. 293-311 (1994)
 - (12) J.Lineig and K.Thlasiraman: 「GASBOR: A Genetic Algorithms for Switchbox Routing in Integrated Circuits」, J.Circ., Syst. Comput., Vol.6, No.4, pp. 359-373 (1996)
 - (13) 増田 達也, 林 泰幹, 重弘 祐二, 井上純一: 「異種個体群が共存する遺伝的アルゴリズムによる VLSI チャネル配線手法」, 電気学会論文誌 C, Vol.120-C, No.11, pp. 1615-1621 (2000)
 - (14) T.Gao and C.L.Liu: 「Minimum Crosstalk Channel Routing」, Proc. Int. Conf. Computer Aided Design, pp. 692-696 (1993)
 - (15) S.M.Sait and H.Youssef: 「VLSI Physical Design Automation」, McGraw-Hill, London (1995)
 - (16) T.Yoshimura and E.S.Kuh: 「Efficient algorithms for Channel Routing」, IEEE Trans. Computer Aided Design, Vol.CAD-1, No.1, pp. 25-35 (1982)
 - (17) B.W.Kernighan, D.G.Schweikert and G.Persky: 「An optimum channel-routing algorithm for polycell layouts of integrated circuits」, Proc.10th Design Automation Workshop, pp. 50-59 (1973)
 - (18) M.Burstein and R.Pelavin: 「Hierarchical channel router」, Proc.20th DAC, pp. 519-597 (1983)
 - (19) J.Reed, A.Sangiovanni-Vincentekki, and M.Santamauro: 「A new symbolic channel router: Yacr2」, IEEE Trans. On Computer-Aided Design, CAD-4(3), pp. 208-219 (1985)

吉 川 雅 弥 (正員) 1972 年 8 月 14 日生。2001 年 3 月立命館大学大学院理工学研究科総合理工学専攻博士課程後期課程修了。1998 年 4 月～2001 年 3 月同大学理工学部第 1 号助手。現在, 同大学総合理工学研究機構 VLSI センター研究員。工学博士。LSI 設計, 遺伝的アルゴリズム, 並列分散処理の研究に従事。電気学会, 情報処理学会, システム制御情報学会, 日本ファジィ学会, IEEE などの会員。

寺 井 秀 一 (正員) 1944 年 12 月 13 日生。1969 年 3 月京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。日立製作所入社。中央研究所, 汎用コンピュータ事業部を経て, 1994 年 4 月立命館大学理工学部電気電子工学科教授。工学博士。LSI デザインオートメーションシステムの研究に従事。電気学会, 電子情報通信学会, 情報処理学会, システム制御情報学会などの会員。