

トレンブリング・スポットチェック法による グローバル配線

豊永昌彦¹⁾ 奥出博昭¹⁾ 秋濃俊郎²⁾

1) 松下電子工業(株) DA開発研究所

2) 松下電器産業(株) 半導体研究センター

磁性体スピン形問題の解析手法である分子場近似法をもとにした、極小解に陥らない最適化手法トレンブリング・スポットチェック法を用いた、グローバル配線法について報告する。ネットの作る配線経路を、自由度をもつ経路と自由度をもたない経路を分離し、自由度を持つ配線のみに改善を施すことにより、大規模なスタンダードセルブロックに対しても、高速で、高品質な結果を得ることができる。本手法をソルボーン社のワークステーションシリーズ4/600の上で実現し時間を観測したところ、3000セルのスタンダードセルブロックに対して、初期割付は、7秒、改善完了までに約2時間要した。結果は、シミュレーテッド・アニーリング法による改善に比べて約4倍の早さで、質は4%優れていた。

Global wiring by Trembling Spot-Check

Masahiko Toyonaga¹⁾, Hiroaki Okude¹⁾ and Toshiro Akino²⁾

1) Design Automation Dev. Lab. Matsushita Electronics Corporation

2) Semiconductor Research Center Matsushita Electric Industrial Co.,Ltd.

We present a standard-cell global wiring system by using the Trembling Spot-Check method which is based on the theory in the magnetic spin system. At the first step, we divide the paths of nets into changeable paths and fixed paths, where the changeable path means the flexible path under the minimum path length constraints. Then we improve the changeable paths by using the Trembling Spot-Check. This approach can derive a good solution for the gigantic standard-cell block data in a short CPU time.

We implemented our method on the Solbourne workstation series 4/600, and do experiments to evaluate. As the result, our method required 7 seconds for the initial global wiring, and two hours for the final global wiring for standard-cell block including about 3000 cells. The evaluation value of quality by the Trembling Spot-Check is 4% better than that by the simulated annealing.

1. はじめに

近年、集積回路の製造技術の向上によるデザインルールの微細化が進み、大規模の回路を1チップ上に作成することが可能となってきた。1チップ上で実現するシステムの巨大化に伴い、LSIの自動設計を目指すDAシステムにとって、その取り扱う素子数の増大化によるレイアウト結果の質的な向上が要求されつつある。特にスタンダードセル方式ブロック等のセル配置の後、詳細配線を決定的に決めてしまうグローバル配線には、より高い品質が要求される。一方、グローバル配線は、ピン位置、セル形状、チャンネルの混雑度などをブロック全体にわたり忠実に取り扱うため検索する組み合わせ状態の空間は膨大である。

従来のグローバル配線法では、ネットにつながる多数の端子を同時に扱うことが困難であるため、その前処理として多分岐ネットを2端子分割し、さらに先着順に経路を決めて、軽路上の配線が集中するところを避けながらすべての経路を決定する方法が主であった[1]。しかし、このような方法では局所的な取り扱いとなり、良質の解は期待できない。また、近似的に最小スタイナー木を求めて割り当てて行く方法も提案されているが、改善段階において迷路配線法を用いており、様々な配線を検索してえられるより高品質なグローバル配線結果を求めることが難しい[2]。

膨大な組み合わせ問題を、極小解に陥ることなく、より大局的に優れた近似解を求める方法として、シミュレーテッド・アニーリング法がある[3]。S. Kirkpatrickらは、グローバル配線について同手法を適用するため、配線形状をL経路、Z経路の2種類に分ける方法を提案した[4][5]。しかし、そもそものようにZ経路や、L経路に分割するかについては、明確にしていない。また、シミュレーテッド・アニーリング法をそのまま適用するには、膨大な計算機コストを必要とするため、実システムに用いることが難しい。我々は、先に配置手法において、膨大な組み合わせ状態空間をより効率良く検索するトレンプリング・スポットチェック法を提案し、同手法により、シミュレーテッド・アニーリング法に比べて、より短時間により高品質の解を得ることができることを示した[6]。しかし、本手法をもってしても、膨大な組み合わせ状態空

間を持つグローバル配線問題にそのまま採用することは、難しいと予想される。

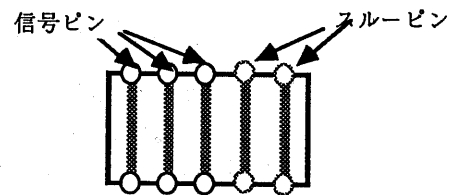
そこで、我々は、グローバル配線の経路を自由経路と、固定経路に二分し、その結果より、自由経路配線のみ、トレンプリング・スポットチェック法による改善を行なうことにより、高速で、良質な結果を得ることのできるグローバル配線法を開発したので、ここに報告する。

以下第2章では、グローバル配線モデルの説明をする。第3章では、トレンプリング・スポットチェック法を用いたグローバル配線アルゴリズムの説明を行ない、第4章では、実データに適用した実験結果から本手法の有効性を評価する。第5章で、本報告をまとめる。

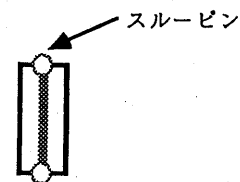
2. グローバル配線モデル

2.1 セル形状と端子

本グローバル配線手法は、スタンダードセルを意識したもので、セルモデルは、図2.1(a)に示すように上下に等価端子をもち、端子と同一のネットについては端子を通じてフィードスルーが可能なものとする。また、単なるフィードスルーピンも定義でき、必要に応じて図2.1(b)に示すようなフィードスルーセルを用いることができる。



(a) スタンダードセルモデル



(b) フィードスルーセルモデル

図2.1 セルモデル

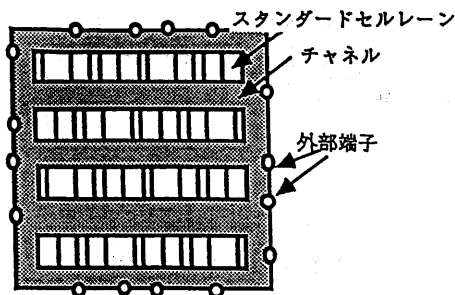
2.2 グローバル配線評価モデル

本グローバル配線手法では、最小化する評価関数を配置システムと共通化しており[7]、各チャンネルの配線密度とレーン上のスルー密度の平坦化を評価している。次式に評価関数を示す。

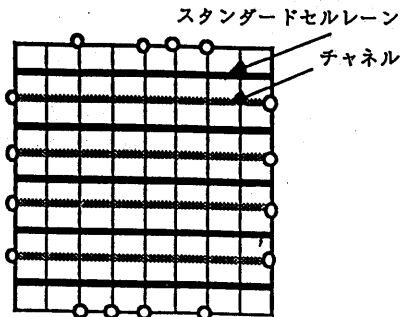
$$\text{COST} = a \cdot S_c + b \cdot S_t$$

ここで、 S_c は、チャンネル領域の配線密度の標準偏差、 S_t は、スルー配線密度の標準偏差である。また、 a 、 b は、重みパラメータである。

全てのピン位置まで含めて、配線密度を評価することはデータ量が膨大になるため難しい。そこで、仮想格子を設定する方法により、チャンネル領域の配線密度、セルレーン上通過配線密度の評価を行なう。このように設定するとチャンネル



(a) 実配置



(b) グリッドマップ

図2.2 グリッドモデル

配線密度の標準偏差、スルー配線密度の標準偏差は、以下のようにして表せる。

$$S_c = [\sum \{ \sum (Dc(i,j) - Av_Dc(j))^2 / Nw \} / Nh]^{1/2}$$

$$S_t = [\{ \sum \sum (Dt(i,i) - Av_Dt)^2 \} / (Nw \cdot Nh)]^{1/2}$$

ここで、 Nw 、 Nh は、横方向のグリッド数、縦方向のグリッド数、 $Dc(i,j)$ は、 (i,j) 位置におけるチャンネル通過配線数、 $Av_Dc(j)$ は、 j 番目のチャンネル内のグリッド点におけるスルー配線数の平均である。また $Dt(i,j)$ は、 (i,j) 位置におけるスルー配線数、 Av_Dt は、各グリッド点におけるスルー配線数の平均である。格子の形状は、具体的には、図2.2(a)に示すような、スタンダードセル配置を同図(b)に示すグリッドマップに示すものを用いる。

3. トレンプリング・スポットチェック法によるグローバル配線

我々は、先に配置手法において、膨大な組み合わせ状態空間をより効率良く検索する最適化手法として、トレンプリング・スポットチェック法を提案し、同手法が、シミュレーテッド・アニーリング法に比べ、より短時間により高品質の解を得ることを示した[6]。本章において我々は、本手法をグローバル配線に適用する方法について述べる。

3.1 処理の流れ

膨大な組み合わせ状態空間を持つグローバル配線問題については、をそのまま採用することは、難しいと予想される。そこで、各配線の経路について、最短経路で結線することを前提として[4]、自由経路と、固定経路に二分する。固定経路については、配線混雑を改善するバックグラウンドとみなし、自由経路のみ、トレンプリング・スポットチェック法により改善を行なう。以上処理も含めて全体の流れを以下に示す。

[グローバル配線の処理の流れ]

- ステップ1. データの入力
- ステップ2. グリッドマップの作成
- ステップ3. 配線経路の作成
- ステップ4. 配線経路の種類分け
- ステップ5. 自由経路の改善
(トレンプリング・スポットチェック法)
- ステップ6. スルーピン、スルーセル位置の決定
- ステップ7. ピン設定
- ステップ8. データの出力

3.2 配線経路の決定

配線経路の決定は、Primの方法[8]により、配線経路形状を求める。(図3.2参照)

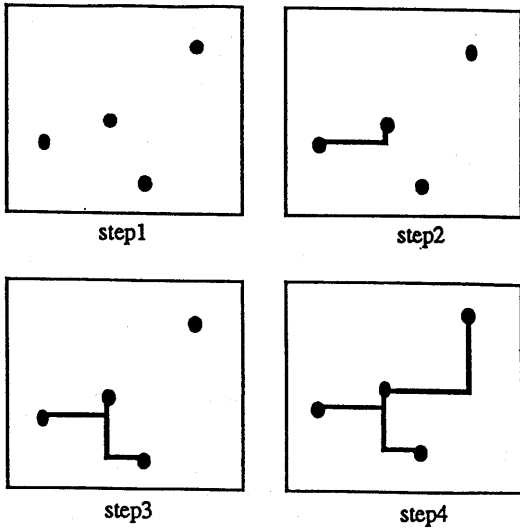


図3.2 経路の決定

3.3 配線経路の種類

最短距離で、各端子を結線する場合において、配線経路は、図3.3.1(a)に示すように、経路が固定となり、不動であるものと、図3.3.1(b)に示すように、様々な経路が変更できるものとに大別できる。

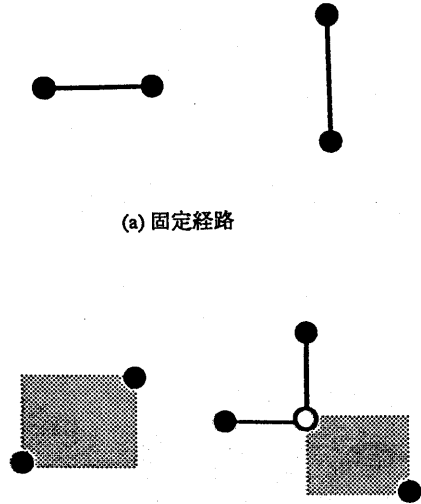
配線経路が、可変な経路については、図3.3.2(a), (b)に示すような2種類の決定方法がある[4]。

我々は、このZ経路について以下のようにランダムウォーク問題として生成する。

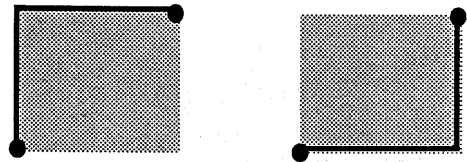
```
Z_path_generation ()
{
int x, y, dx, dy; /* random_walk algorithm */
dx = 1; if ( start.x > target.x ) dx = -1;
dy = 1; if ( start.y > target.y ) dy = -1;
x = start.x; y = start.y;
while ( x != target.x && y != target.y ) {
if ( x == target.x ) {
y = y + dy;
} else if ( y == target.y ) {
x = x + dx;
} else if ( mod( rand(), 2 ) == 1 ) {
x = x + dx;
} else {
y = y + dy;
}
}
}
}
```

Z経路発生アルゴリズム

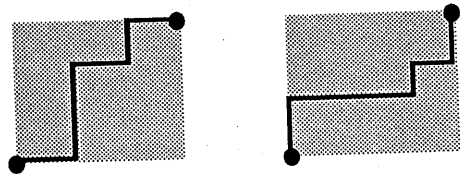
ここで、start.x、start.yは、配線始点のx、y座標、またtarget.x、target.yは、終点の座標である。dx, dyは、配線の進む変位置量(1グリッド単位)である。rand()は、1から、10000000までの乱数発生関数である。このZ経路発生法により様々なタイプの経路を作成することができる。



(a) 固定経路
(b) 自由経路
図3.3.1 配線経路の種類(I)



(a) L経路



(b) Z経路

図3.3.2 配線経路の種類(II)

3.4 自由経路の改善

前節で求めた自由経路について、トレンプリング・スポットチェック法によるグローバル配線の改善を行なう。トレンプリング・スポットチェック法は、元々配置決定や、回路分割についてその有効性が確認された組み合わせ問題最適化手法である。トレンプリングスポット法は、磁性体の研究で用いられる分子場近似法から考案された手法で、解を効率良く改善するための範囲（スポット）を定義する所に特色がある[6]。本手法を、グローバル配線問題に適用するためにまずスポットの定義を行ない、その後に全体の流れについて述べる。

3.4.1 グローバル配線におけるスポット

配線経路を、先程のZ経路発生法により変更する場合、あらゆる形状が生成されることが予想できる。しかも、その形状同士で相関はなく、独立しているであろう。スポットの概念としては、スポット内の状態変更が、外部に決定的な大きな影響を与えず、あくまで微小な変化を起こす範囲としてとらえ、図3.3.4に示すような配線経路群をスポット内の検索対象となる経路群とする。

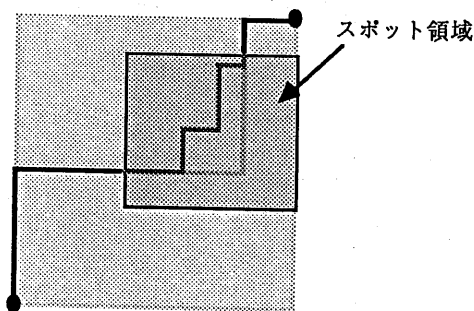
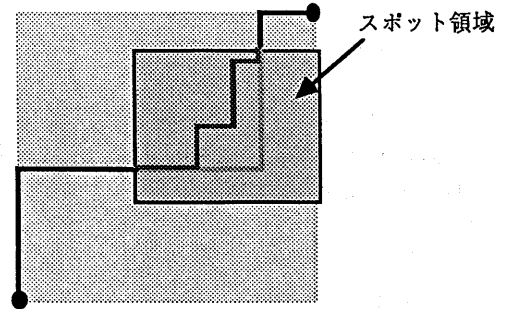


図3.4.1 グローバル配線のスポット

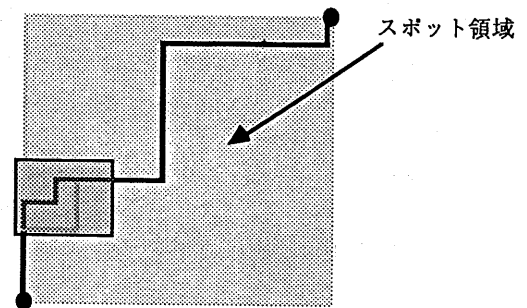
スポット内の経路群の検索において、コスト変化の受容値（揺らぎ又は、冗長度）は、配置におけるトレンプリングスポットチェック法における類推から、以下のものとする。

$$dF = S \cdot Sr$$

ただし、ここで、Sは、スポットの大きさ、Srは、ランダムな経路変更時に求められるコスト変化値の揺らぎ値(標準偏差値)である。初期スポットの大きさは、最大の配線経路長とする。また最終のスポット値として経験的に、6とする。ただし、最終スポット値の時には、dFを強制的に0とする。(図3.4.2参照)



(a) スポット大きい



(b) スポット小さい

図3.4.2 スポットの変化

3.4.2 トレンプリング・スポットチェック法

以上のスポットの定義を用いて、経路改善を行なう。我々の提案するグローバル配線手法におけるトレンプリング・スポットチェック法のアルゴリズムを以下に示す。

- 1) ランダムに選んだ経路のランダムに選んだ折れ曲がり点を含むSの長さの領域をスポットとして登録する。
- 2) 領域外の形状を保ったまま、スポット内部の経路の変更を行なう。
その後に、以下のコスト差を評価する。
コスト差 = 現在のコスト - 変更後のコスト <math>< R \cdot dF(S)</math>
上記式が真ならば、新しい経路を受け入れる。

の制約の中でのランダム配線結果で、その意味では、全くのでたらめな配線結果ではない。

配線のグリッドマップは、縦方向と、横方向を別々に用いている。実験結果の図のグリッドマップは、チャンネル方向の配線のみを示した。縦方向の通過（スルー）本数が横方向の配線密度にどのような影響があるかの見積りとして、我々はチャンネル部分を通過する縦グリッドマップの値を0.5倍してチャンネル方向に足してほぼ最終の詳細チャンネル配線結果に近い値が求められることがわかっている。

6. むすび

局所最適解に陥らない最適化手法トレンブリング・スポットチェック法を用いる際に、自由度をもつ経路と自由度をもたない経路を分離し、大規模なスタンダードセルブロックに対しても、高速で、高品質な結果を得るグローバル配線手法について述べた。本手法をソルボン社のワークステーションシリーズ4/600の上で実現し時間を観測したところ、3000セルのスタンダードセルブロックに対して、初期割付は、7秒、改善完了までに約2時間要した。結果は、シミュレーテッド・アニーリング法による改善に比べて約4倍の早さで、質は4%優れていた。

7. 謝辞

著者らは、本研究を進めるのに当たりご助言ご協力をいただいた、福井、山本、川上以下次世代レイアウトシステムMAPLES開発メンバーの各位と、本研究の機会を与えていただいた、松下電子DA開発研究所の泉所長、千村室長、および半導体研究センタの堀内取締役、間野所長に感謝いたします。

[参考文献]

- [1] R. Nair : "A Simple Yet Effective Technique for Global Wiring," IEEE Transactions on CAD, Vol. 6, No. 2, March (1987), 165.
- [2] J. Rose : "LocusRoute: A Parallel Global Router for Standard Cells," 25th ACM/IEEE Design Automation Conference, June (1988), 189.
- [3] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, Jr., and M. P. Vecchi : "

Optimization by Simulated Annealing," Science 220 (1983) 671.

[4] S. Kirkpatrick, M. P. Vecchi : "Global Wiring by Simulated Annealing," IEEE Transactions on CAD, Vol. 6, No. 2, October (1983), 215.

[5] C. Sechen and A. Sangiovanni-Vincentelli : "TimberWolf3.2: A New Standard Cell Placement and Global Routing Package," 23rd ACM/IEEE Design Automation Conference, June (1986), 432.

[6] M. Toyonaga, H. Okude and T. Akino: "Placement Optimization by Trembling Spot-Check," The Transactions of the IEICE, December (1989), 1350.

[7] 奥出、豊永、秋濃: "配置評価関数の一考察," 電子情報通信学会研究会報告, VLD89-93, 2月(1990), 17.

[8] A.V.Aho : "Data Structure and Algorithms," Addison-Wesley Publishing Company Reading, MA, (1983), 234.