

BGAパッケージにおける 最大密度を低減する順行配線修正法の提案

野村 義孝[†] 高橋 篤司[†]

[†] 東京工業大学大学院 理工学研究科 集積システム専攻 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1-S3-58
E-mail: †{ynomura,atsushi}@lab.ss.titech.ac.jp

あらまし LSIの大規模化、高集積化に伴いBGAパッケージを短時間で設計するのは困難になっているため、設計の自動化への要求が高まっている。配線設計の自動化への取り組みの1つとして、配線形状を順行だけに制限する配線手法が提案されているが、順行配線のみではデザインルールの1つである配線密度の上限を満たすのは難しい。そこで、本稿では1層配線を想定し順行配線を修正し逆行配線を導入することで配線密度を満たす手法を提案する。逆行配線の導入により、配線長が増加するが配線密度を改善することをできる。提案手法をプログラム実装したところ、配線密度を満足していなかった配線問題に対して、配線密度を満足する配線経路を得ることができた。

キーワード BGAパッケージ、順行配線、逆行配線、配線密度

Modification of monotonic route to reduce maximum density for single layer BGA package

Yoshitaka NOMURA[†] and Atsushi TAKAHASHI[†]

[†] Department of Communications and Integrated Systems, Tokyo Institute of Technology
2-12-1-S3-58 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan
E-mail: †{ynomura,atsushi}@lab.ss.titech.ac.jp

Abstract As LSI chips become larger and highly integrated, the necessity for design automation of LSI package becomes larger since it becomes difficult to design a LSI package in short time. To accelerate the design automation, monotonic routing in package routing is investigated recently. However, it is hard to satisfy the routing density constraint only by monotonic routing. In this paper, we propose a routing algorithm that modifies monotonic routing to satisfy the routing density constraint by introducing non-monotonic routing. In experiments of examples that can not be satisfied routing density constraint by monotonic routing, we show that the routing density constraint is satisfied by the proposed algorithm.

Key words BGA package, monotonic routing, non-monotonic routing, routing density

1. はじめに

LSIの大規模化・高密度化によりLSIパッケージのI/O端子数は増加の一途をたどっている。数百を超えるようなI/O端子を実現するために、I/O端子をパッケージの底面にアレイ状に配置するBGA(ball grid array)型のパッケージが用いられるようになっている(図1参照)。また、このような状況においてパッケージ内でデザインルールを満たす配線を得るのは困難となり、手動による配線には時間がかかるようになってきた。したがって、デザインルールを満たしながら多くの配線を短時間で生成するために、配線設計の自動化への要求が高まっている。パッケージではボールとパッドを接続することが求められる

が、パッケージ設計は回路設計とプリント基板設計と並行して行われる。したがって通常、ボールとパッド間の接続要求が与えられる。

文献[1]では、1層BGAパッケージに対して接続要求を生成手法が提案され、文献[2]では、それを改良した手法が提案された。与えられた接続要求に対する自動配線手法として文献[3]ではPGA(pin grid arra)、文献[4]ではBGAに対する多層パッケージ配線手法が提案されている。また、ボールとパッド間の接続において配線経路が一意に定まり、配線長が比較的短くなるように配線形状を順行に制限する手法が盛んに研究がなされている。これらの手法では、順行配線可能であるための条件が与えられ、条件を満たす場合に配線を自動的に生成する。[5]で

配線要求が与えられないゲームボールを考え、各格子辺に配線容量を定義することで、より一般的な配線領域や配線問題を扱うことができるが、表記が複雑になるので、以下では、配線領域は矩形ですべてのボールに対して接続要求が与えられるとして説明する。

パットとボールに接続する配線の概略経路は格子辺の系列で表現され、その配線の配線長は格子辺の系列の長さとする。格子辺の配線密度は、その格子辺を経由する配線の本数とする。

図5において、 N_2 の配線(点線)が各ボール間と交差するところに小さな黒い印がつけてある。この黒い印の合計が点線の配線長になる。 N_2 の配線長は5である。ボール B_1 と B_2 の間の配線密度は3である。

順行配線条件を満たすネットが与えられたとき、配線を順行で実現すると経路は一意に定まるためボール間の配線密度も一意に定まる。つまり、順行配線におけるボール間の配線密度はネットが与えられたときに決定される。

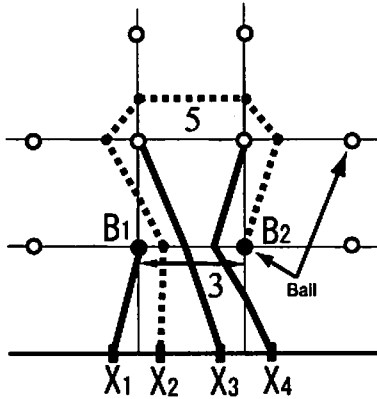


図5 配線密度と配線長の定義

BGA パッケージにおける配線問題は次のように定義できる。

入力 順行配線条件を満たすネット

配線密度の制限

出力 配線密度の制限を満たす各ネットの配線

本稿では、特に水平格子辺の密度に着目し、水平格子辺の密度が制約を満たす配線を出力することを目的とする。

3. 配線修正操作

本稿では、順行配線条件を満たすネットに対する順行配線に対して、局所的な修正を繰り返すことで密度条件を満たす配線を得ることを目指す。本節では、配線に対する局所的な修正操作について述べる。

3.1 配線修正操作

配線修正操作は、ボールとボールに隣接する配線に着目し2段階で行なう。配線修正操作は、着目したボールを B 、着目した配線のボールに対する隣接方向を D 、着目した配線本数を N としたとき、配線修正 $M(B, D, N)$ と表現する。 D は右または左であるが、操作は左右対称であるので、以下では D は右であるとして説明する。

配線修正 $M(B, D, N)$ の第1段階では、ボール B の右側(D 側)に隣接する N 本の配線の経路を B の左側に隣接する経路

となるように修正する。以後、この操作を配線の移動と呼ぶ。第2段階では、第1段階の修正で生じた配線の交差を解消するように B に接続する配線の修正を行なう。第1段階の配線の移動、および、第2段階の配線の修正は、それぞれ配線経路と配線密度の変化が最小となるように行なう。以下では2つの段階をより詳しく説明する。

• 第1段階

第1段階の配線の移動では、移動した配線の水平格子辺の系列を考えると、 B の右側の水平格子辺が B の左側の水平格子辺に置き換えられるだけである。したがって、移動した配線と B に接続する配線の交差が生じ、ボール B の左右の配線密度は変化するが、他の部分の配線密度は変化しない。

• 第2段階

第2段階の配線の修正では、 B に接続する配線の経路が第1段階で移動された配線のボールを迂回するように変更される。

配線修正 $M(B_i, \text{右}, 1)$ の第1段階を図6に、第2段階を図7に示す。図6に示すように、配線修正 $M(B_i, \text{右}, 1)$ の第1段階では、着目ボール B_i の右側に隣接するネット N_j の配線経路 l_j を B_i の左に隣接するように変更する。経路を変更した後の配線経路を l'_j とする。図6から分かるように、配線経路 l'_j とネット N_i の配線経路は交差する。また、 l_j と l'_j の水平格子辺の系列の違いは、 B_i の左右の水平格子辺が入れ替わるだけである。

図7では、ボール B_i に接続している配線 l_i の経路を、 l'_i との交差を解消するように変更する。修正後の配線を l'_i とする。 l'_i は B_i と l'_j を囲むように、格子辺との交差が最小となるように B_i と接続される。

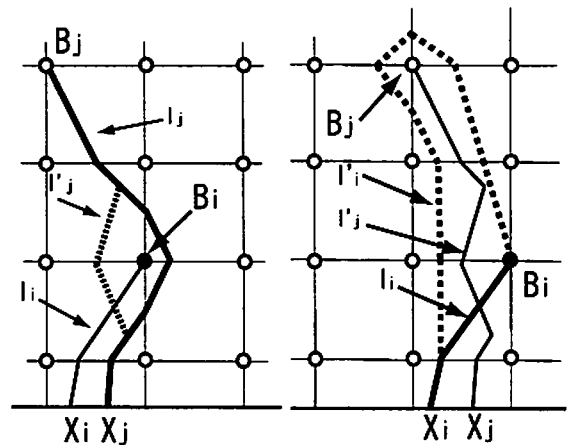


図6 第1段階

図7 第2段階

3.2 配線修正操作と配線密度の変化

配線修正操作により、各格子辺では配線密度の増減が生じ、第2段階の配線修正では配線長の大きな増加も生じる。

配線修正 $M(B_i, \text{右}, N)$ では、 B_i の右側の格子辺の配線密度が減少することが期待されるが、 B_i の左側の格子辺の配線密度は少なくとも $N+1$ 増加する。また、第1段階で移動した配線が移動部分よりもボール側で交差する格子辺の密度は第2段階で修正した配線の影響により増大する。

配線密度や配線長の増加は、配線修正の第1段階で移動する配線の逆行度、第2段階で修正される配線の逆行度に大きく依存する。

【補題1】 配線修正 $M(B_i, D, 1)$ において、 B_i が順向ポールであり、第1段階で移動する1本の配線の逆行度が k であるならば、各格子辺の密度の増加は高々 $2k + 2$ である。 ■

第1段階で移動した配線が移動部分よりもポール側で交差する格子辺の密度は第2段階で修正される配線の影響で増加する。第2段階の配線修正において、 B_i への配線は第1段階で移動した配線に沿って修正される。逆行度 k の配線はある格子辺を $k + 1$ 回通る可能性があり、その場合修正配線はその格子辺を $2k + 2$ 回通る可能性がある。また、格子辺を冗長に通る修正は行なわないため、修正配線はその格子辺を $2k + 2$ 回を超えて通ることはない。

図8は $M(B_i, 右, 1)$ において移動する配線 N_j の逆行度 $k = 2$ のときの例である。ポール B_x と B_y 間に N_j の移動配線が3回通っている。第2段階で修正される配線は N_j の配線に沿って修正される(図8の荒い点線)。それ故、ポール B_x と B_y 間の配線密度は6だけ増加する。

【補題2】 配線修正 $M(B_i, D, N)$ において、 B_i が順向ポールであり、第1段階で移動する N 本が順向であるならば、各格子辺の密度の増加は高々 $2N$ である。 ■

このとき、配線修正 $M(B_i, 右, N)$ において、 B_i の右側の配線密度は N 減少し、 B_i の左側の配線密度は $N + 1$ 増加する。また、第1段階で移動した配線が移動部分よりもポール側で交差する格子辺の密度は第2段階で修正される配線の影響で増加する。第2段階の配線修正において、 B_i への配線が N 本の配線に沿って修正されるため、 N 本の配線が同じ格子辺を通る場合、修正配線はその格子辺を $2N$ 回通る可能性がある。また、格子辺を冗長に通る修正は行なわないため、修正配線はその格子辺を $2N$ 回を超えて通ることはない。

図9は移動配線数 N が3のときの例である。ポール B_x と B_y の間に移動配線が3本すべて通っている。各移動配線同士の間逆行配線が割り込んでいるため、第2段階での修正では各移動配線に沿って修正が行われる(図9の荒い点線)。そのため、ポール B_x と B_y の間を配線密度は、6だけ増加する。

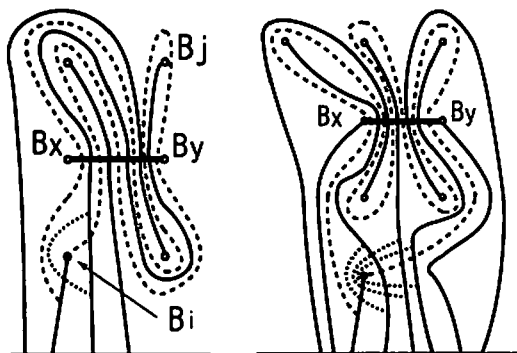


図8 逆行度 $k = 2$ の場合 図9 移動配線数 $N = 3$ の場合

【補題3】 配線修正 $M(B_i, D, N)$ において、 B_i が順向ポールであり、第1段階で移動する N 本が順向であり、さらに B_i よりも

りも上部に逆行ポールが存在しなければ、各格子辺の密度の増加は高々2である。 ■

このとき、移動配線のポールは各ポール行で連続し、第2段階で修正される配線はそのポールを囲むように修正されることに注意して欲しい。したがって、配線修正 $M(B_i, 右, N)$ において、 B_i の右側の配線密度は N 減少し、 B_i の左側の配線密度は $N + 1$ 増加する。また、第1段階で移動した配線が移動部分よりもポール側で交差する格子辺の密度は第2段階で修正される配線の影響で増加するが、格子辺の密度の増加は高々2であり、各ポール行でも密度の合計の増加は高々2である。

図10は $N = 1$ の例である。第1段階ではネット N_j を修正した。図10の T_j は修正部分よりもポール B_i 側の配線である。第2段階の修正では T_j の沿って修正されるので、配線密度の増加は高々2である。

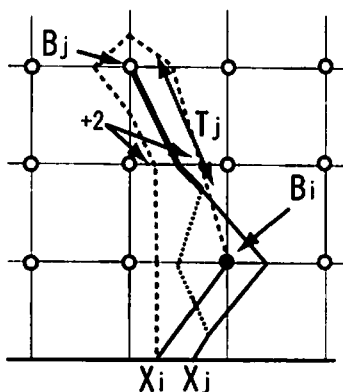


図10 配線密度の増加

3.3 逆行度の変化

【補題4】 配線修正 $M(B_i, D, N)$ において、 B_i が順向ポールであり、第1段階で移動する N 本が順向でさらに B_i よりも上部に逆行ポールが存在しなければ、 B_i の配線の逆行度は1となる。 ■

補題3より、各ポール列でも密度の増加は2におさまる。よって、第2段階での修正による逆行度は1になる。

図12のように順向ポール B_i よりも上部に逆行ポールが存在すると、 B_i への配線の逆行度は大きくなる可能性があるが、図11のように順向ポール B_i よりも上部に逆行ポールが存在しないならば、 B_i への配線の逆行度は1となる。

4. 配線修正アルゴリズム

本節では初期配線を順向配線とし、配線修正 $M(B, D, N)$ を繰り返す。配線密度を減少させるアルゴリズムを提案する。

前節で考察したように、順向ポール B に着目し順向配線を移動するならば、配線修正 $M(B, D, N)$ による配線の逆行度や配線密度の増加は抑えられる。さらに、配線修正 $M(B, D, N)$ によるポール B は逆行ポールとなるが、 B よりも上部に逆行ポールが存在しなければ逆行度の増加や配線密度の増加を抑えることができる。したがって、提案アルゴリズムでは、配線修正 $M(B, D, N)$ による配線の逆行度の増加による配線長の過度の増大や配線密度の過度の増加を避けるために、水平格子辺の

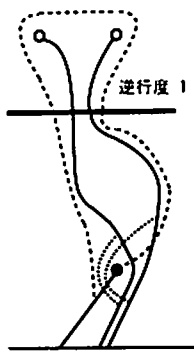


図 11 すべての
順行ボール

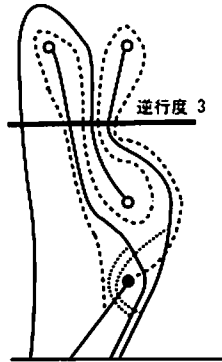


図 12 一部が
逆行ボール

密度を下から上に向かって配線密度の制約値以内とするように、配線修正 $M(B, D, N)$ を領域の下から上に向かって行なう。

以下では、配線密度の制約値を P とする。初期状態では、逆行ボールは存在しない。

まず最初に、配線密度が制約値を超過している格子辺の両側のボールの中で、最も下の行に存在するボール B に着目する。そのようなボールが複数存在する場合は、最も左のボールとする。 B の右側の配線密度を S_i とし、 S_i が P を超過していると

する。このとき、まず、配線修正 $M(B, 右, S_i, -P)$ を行なう。 B の右にある $S_i - P$ 本の配線が順行であるならば、補題 3,4 の条件を満たす。その結果 B の右側の配線密度は制約値 P となる。しかし、 B の左側の配線密度は、 $S_i - P + 1$ だけ増加するため、左側の配線密度が P を超えるならば、 B の左側のボールに着目し、密度を超過した分だけ配線移動を行なう。この操作を繰り返し B の左側の各格子辺の配線密度が P 以下となるまで、 B の左側のボールに着目し配線修正を繰り返す。その際、逆行配線の移動が必要となる場合には操作を中止する。

さらに、 B の右側に配線密度が制約値を超過している格子辺が存在するならば、その格子辺の左側ボール B' に着目し上記と同様の操作を行なう。ただし、逆行ボールに対する修正は行わない。

この操作では配線の移動は左方向になるが、配線の移動を右方向とした同様の操作も可能である。左方向への移動に失敗した場合は右方向の移動を試みる。この操作では、ボールのある行よりも下側の配線は変更されず、変更はボールのある行よりも上側の領域のみでなされることに注意して欲しい。したがって、各配線修正は補題 3,4 の条件を満足している。

上記の操作を下から上に向かって各行で行なう。逆行配線の移動が必要となった場合には、提案アルゴリズムでは密度制約を満たせなかったとして終了する。

5. 実験

提案したアルゴリズムを C 言語を用いて計算機シミュレーションを行った。ボールアレイの大きさが 12×12 の BGA パッケージにおいて、図 15 に示す順行配線を条件を満たすネットを入力とした。シミュレーションは、4 つに分けた領域毎にお

こなった。入力には順行配線条件を満たしているため、すべての配線を順行配線で結ぶことができているが各領域の最大密度はそれぞれ 8, 9, 9, 8 となっている。この入力に対し、配線密度を 7 と設定し、提案したアルゴリズムを適応した結果を図 16 に示す。また、各エリアの最大配線長を表 13、配線長の総和を表 14 に示す。表 13 から全体的に配線長が増加し、表 14 から最大配線長は最大で 2 倍の長さまで伸びていることがわかるが、密度制約は満たされている。

	エリア 0	エリア 1	エリア 2	エリア 3
修正前	127	117	119	127
修正後	154	153	152	135
増加率	21%	30%	27%	6%

図 13 配線長総和の比較

	エリア 0	エリア 1	エリア 2	エリア 3
修正前	9	9	9	11
修正後	18	14	14	11
増加率	100%	55%	55%	0%

図 14 最大配線長の比較

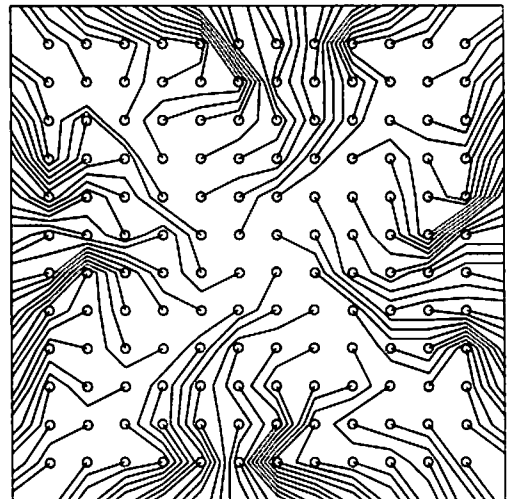


図 15 配線変更前

6. まとめ

各領域毎に、最大配線長は大きく変わることがわかった。エリア 3 のように最大配線長が増加しないような変更が最善であり、エリア 0 のように最大配線長が 2 倍にもなるような変更は、配線の遅延などを考慮するとよくないといえる。状況を比較すると被交差配線が交差位置から近く、複数のボールを移動する際にはまとまっていた方が増加する配線が少ないことがわかる。今後、配線長を考慮した修正手法を検討していきたい。

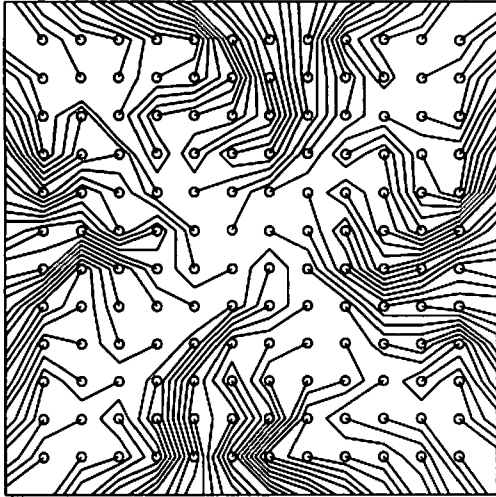


図 16 配線変更後

文 献

- [1] M.-F. Yu and W. W.-M. Dai: "Single-Layer Fanout Routing and Routability Analysis for Ball Grid Arrays", Proceedings of International Conference Computer-Aided Design, pp. 581-586 (1995).
- [2] S. Shibata, K. Ukai, N. Togawa, M. Sato and T. Ohtsuki: "A BGA Package Routing Algorithm on Sketch Layout System", The journal of Japan Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits, 12, 4, pp. 241-246 (1997). (In Japanese).
- [3] C.-C. Tsai, C.-M. Wang and S.-J. Chen: "NEWS: A Net-Even-Wiring System for the Routing on a Multilayer PGA Package", IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 17, 2, pp. 182-189 (1998).
- [4] S.-S. Chen, J.-J. Chen, C.-C. Tsai and S.-J. Chen: "An Even Wiring Approach to the Ball Grid Array Package Routing", Proceedings of International Conference on Computer Design, pp. 303-306 (1999).
- [5] 富岡洋一, 高橋真司: "BGA パッケージにおける順行ピン割り当ての解析及び順行配線経路の自動生成", DA シンポジウム 2005 論文集, 情報処理学会シンポジウムシリーズ, 9, pp. 237-242 (2005).
- [6] Y. Kubo and A. Takahashi: "A Global Routing Method for 2-Layer Ball Grid Array Packages", Proceedings of ACM International Symposium on Physical Design, pp. 36-43 (2005).