

回路配置問題での設計アルゴリズムの研究

—シミュレーテッド・アニーリングの処理の高速化—

A Study on the Algorithms used for Circuit Placement :
On the Speed up of the Processing Time of the Simulated Annealing Algorithm

飯島 義則¹⁾、アルベルト・パラシオス・パウロブスキ²⁾

1) 桐蔭横浜大学工学部電子情報工学科。現在：東京都品川区の(株)キューブシステムに勤務
2) 桐蔭横浜大学工学部電子情報工学科

(2006 年 2 月 28 日 受理)

あらまし 近年、微細化技術の進歩に伴い、回路に集積できる機能等が驚異的に増加してきている。このため、大規模回路を構成する機能ブロックの配置問題が益々困難となりつつある。ブロック配置の問題は、組み合わせ最適化問題であるため、数多くの最適化方法が提案されてきた。本論文は、シミュレーテッド・アニーリング (Simulated Annealing : SA) アルゴリズムの適用について検討を行った。このアルゴリズムを使用すると、良い近似解が得られるが対象回路の規模等によってその処理時間が膨大となる。本論文では、シミュレーテッド・アニーリングを高速に処理するための方法、およびそのときの解の質を保つための条件について述べる。

1. まえがき

近年、高集積 (Large Scale Integrated : LSI) 回路のトランジスタ数は 20 億を超えてきた。これに伴い、一つのチップに内蔵できる機能が増加してきている。その機能をもつブロックやセルの数が増え、回路内の配置が困難となりつつある。これが起因にブロック間やセル間の配線を短縮して、回路の処理性能を向上するための配置問題がある。本論文は、ブロック間やセル間の配線領域を最小とするような、個々のセル位置を求める組み合わせ最適化問題の一つの検討について述べる。実際の回路を対象に最適解を求めると、有り得る解の数が指数的に増加するため現実的な時間で最適解を導き出す方法がない。このため、良質な近似解を求めるヒューリスティックな方法が多数多様提案されてきている。本論文では、[1] のシミュレーテッド・

アニーリング (Simulated Annealing : 以下 SA という) を用いて、その処理時間の高速化について検討を行った。

シミュレーテッド・アニーリング方法は、拒絶アルゴリズム (rejection algorithm) を基として、Metropolis^[2] らがこれを応用してある物理現象のシミュレーションに使用された方法である。従来、SA は色々な分野で有効な近似解を求める手段として使用されてきている^[3]。SA は、非常に良質な近似解に導く方法であるが、解探索を制御する冷却過程の選択が問題によって困難であり、計算時間が長いという短所がある。温度の冷却過程に関しては数多くの報告がある^[4]。また、処理時間についても並列処理等の解決方法等が提案されている^[5]。本論文の配置問題に対する報告も幾つかがある^[6]。本論文で検討した処理性能向上も [6] で検討され、SA に終了条件 $T=0$ が追加された。この条件の追加で SA の外部ループの繰り返し数 (Nout) を

1 Toin University of Yokohama, Faculty of Engineering, Dept. of Electronics and Information. Now with Cube System of Tokyo, Japan.

2 Toin University of Yokohama, Faculty of Engineering, Department of Electronics and Information.

500 のとき、処理時間時の減少が5～6% まで、Nout=1000 のときに約 51% の処理時間が短縮できる改良が得られた。しかし、コスト（配線領域）の改善がみられなかった。このため、本論文では、SA で行われる解の探索を終了させる条件について検討し、処理時間の短縮に役立つ新たな終了条件について以下の3. で述べる。また、集積回路の配置に SA を用いるときの SA の処理時間を決定する入力パラメーターについて検討し、その最適な範囲について以下の4. で述べ、5. で今回検討した新たな対策の比較を行う。6. では本論文のまとめと今後残された問題について概説する。本論文の緒論として次の2. で SA について簡潔に述べる。

2. 集積回路の配置問題と SA

集積回路の構成に用いるものには部分回路、ブロック、セル、ゲート等と呼ばれるものがあるが、以下の説明を分かり易くするためにこれらを総称してセルという。SA でセル配置問題を扱う場合は、図1に示すような配置で SA でのセル位置の入れ替えを行うと、総配線の長さが変化する。この作業を有限回繰り返して調べた範囲内での最も総配線の長さの短い配置が解として導き出される。図1に示す配線の実際の長さではなく、関連したセルのバウンディング・ボックスの周囲の長さの半分だけを配線の計測に用いる。以下では全セルに対応する総配線の長さをコストとして SA のアルゴリズムに用いる。

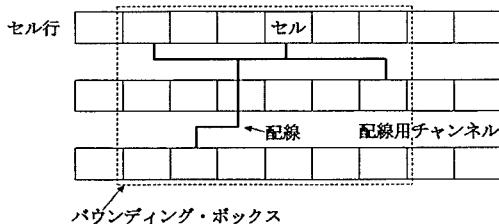


図1 回路のセル間の配線例

2.1. SA の基本アルゴリズム

SA とは金属の焼きなましをモデルにした計算方法である。鋼鉄を冷却する過程を考え、ある時点での過熱炉内の個体の冷却状況を状態にし、過程を有限な状態からなる状態空間 Ω があると仮定する。また、各状態 x に対してエネルギー $E(x)$ が定義されているとする。初期の SA では、このような過程がシミュレートされたため、組み合わせ最適化問題の目的関数はエネルギー関数と呼ばれた。故に、最小のエネルギーの状態、すなわち真最適状態 x^* を求めることが SA の目的となる。

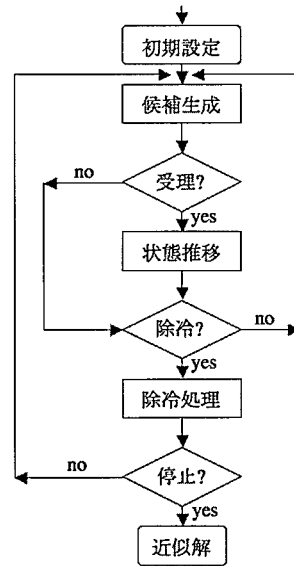


図2 SA の基本アルゴリズム

SA の実行で、ある初期状態から出発して状態を推移させ、最小のエネルギーを検索しながら、最終的には最適状態に行きつくことが期待される。SA の基本アルゴリズムを図2に示す。ここではまず温度 T を初期設定した後、与えられた初期状態 x_0 とこれに対応するエネルギー E から出発して次の状態 x' を生成し、そのエネルギー E' を計算する。エネルギーの差分 $\Delta E (= E' - E)$ と温度 T_k に応じて、新たな(次の)状態を受理するか否かを計算し、受理の場合は次の状態に推移する。この処理を繰り返して、現在の温

度での平衡状態が実現されるまで十分な状態探索を行う。温度 T_k で平衡状態に達したら、除冷処理を行って次の温度 T_{k+1} を求め、再びその温度で平衡状態に達するまで上述の処理を繰り返しながら状態探索を進める。十分温度が冷えて終了条件に達すれば、その時の状態とエネルギーが各々の最適状態、最適値として出力される。

2.2. 配置問題用の SA アルゴリズム

本研究で用いる SA で入力する設定値は、最適化を施す回路の初期配置 (L_0)、初期温度 (T_0)、除冷時の温度の減少率 (α)、ある温度での計算を行う回数を示す一周期計算回数 (N_{in}) と、除冷回数を示す冷却回数 (N_{out}) の5つである。配置問題用の SA アルゴリズムを図3に示す。

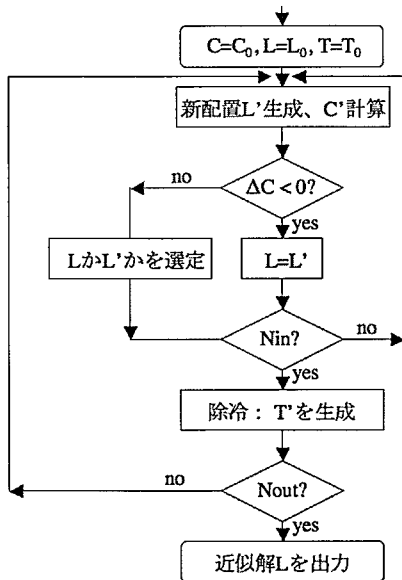


図3 配置用 SA アルゴリズム

3. 処理時間短縮用の終了条件

現在用いている SA では、終了条件がアニーリングを定めた回数だけ繰り返して終了というものであり、これにアニーリングで温

度が0という不変状態になった場合にも計算を終了させるというアルゴリズムを加え計算時間の短縮が行われた^[7]。ここにさらに時間を短縮するために、計算された配線コストが一定回数の計算を行っても改善や改悪の変化が起こらなくなった時に、計算を終了させるという新たな終了条件を考案した。ここではその終了条件を、10回連続して解の変化が無い場合とした。そして原型のものと、終了条件が温度0の従来のものと、新しく考案した終了条件のものを、439セルで構成された算術論理回路に同一の設定値で30回試行した結果を比較し、時間の短縮度合いと計算結果について検討を行った。計算時間と計算結果の平均値と最小値の割合の比較を図4に示す。計算時間は新方法では原型の1/2である従来のものからさらに1/3に短縮することができることが分かった。

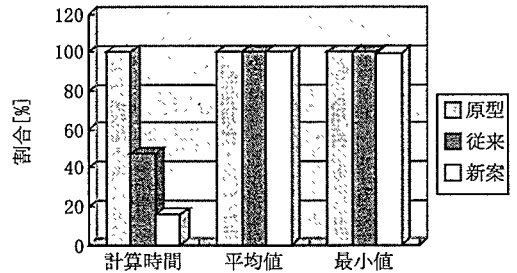


図4 3方法の質比較

計算結果は新方法の平均コストは原型や従来のものに比べ低くなっているが、最小コストは新方法でも低いものを得ることができた。以上のことから計算時間の短縮がよくでき、計算結果も悪くならないため、この新しく考案した終了条件は有効であるといえる。

4. SA の入力値の検討

新たな終了条件の下で配線量の少ない低コストの回路配置状態を得るための設定値の検証も行った。Nin の適切な数値を検討するために、ここでも設定値は、 L_0 を 439セルで構成された8ビットの算術論理演算器の回路

に、 T_0 を 1000 に、 N_{in} を 300、500、1000、2000、3000 及び 4000 に、 N_{out} を 1000 にして、 α は温度に応じて 0.7、0.95、0.1 という 3 段階に変化するもの^[7]、途中終了条件は 10 回連続して解の変化が無い場合として、この条件で各 N_{in} で計算を 30 回行い、平均値と最小値を算出して比較した。その結果を図 5 に示す。

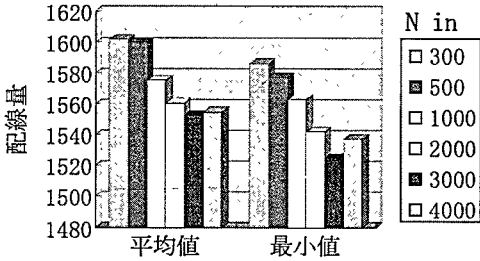


図 5 各 N_{in} での計算結果の比較

N_{in} の 3000 と 4000 の場合は、平均値があまり変わらず、続いて 2000 のものが良い結果となった。 N_{in} の 3000 のときは、最低値が一番低く 2000 と 4000 のがほぼ同じであった。比較すると N_{in} の 1000 の最低値が 2000 の平均値に届かないことから N_{in} は 2000 回以上を考え、平均値や最低値が N_{in} の 3000 のが一番低かったことから、それ以上に回数を増やしてもかかる時間の増加とコストの低下のバランスが悪いと思われるため、この回路の場合には N_{in} は 3000 が余計な時間をかけずに低コストの結果が出せる数値であると考えられる。

5. 冷却過程による結果の比較

これまでの成果として得られた追加終了条件による計算時間の短縮と、配線量の少ない結果が得られる設定値を用いて冷却過程による計算の結果の検討と比較を行って、有効な値を求めた。ここで用いる冷却過程は、関数的な減少を行っていく 10 種類の冷却過程である^[8] (以下 OC1 ~ OC10 という)。OC1 ~ OC10 は、初期温度 T_0 から最終温度 T_N ま

での間で計算を行うものである。これより、 T_N は解収束付近の 0.01 とし、途中終了条件は 10 回連続して解の変化が無い場合とした。また、次の二つのパターン設定値を用いた。

- 1) $T = 1000$ 、 $N_{in} = 3000$ 、 $N_{out} = 200$
- 2) $T = 1000$ 、 $N_{in} = 200$ 、 $N_{out} = 3000$

各々のパターン設定で計算を冷却過程毎に各 10 回、合計 200 回行い、計算結果の平均値と最小値、および計算時間を算出して比較した。その結果を図 6、図 7、図 8、および図 9 に示す。この結果から、設定値 1) では OC1、OC4、OC5、および OC6 の冷却過程では温度が下がりにくいか冷却が強すぎるために、設定された冷却回数 200 では良い結果が見られなかった (図 6)。しかし、その他の OC2、OC3、OC7、OC8、OC9、および OC10 では、配線量の少ない結果を出すことができた (図 7)。

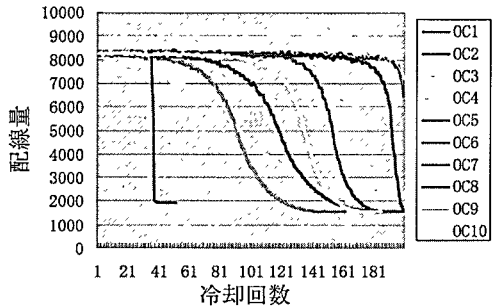


図 6 設定値 1) での OC1 ~ 10 の結果 (平均値)

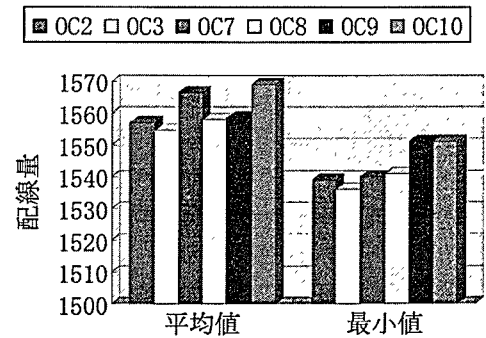


図 7 設定値 1) での有効な計算結果の比較

設定値 2) でも同様な傾向と結果が得られた (図 8)。 N_{in} を多くした設定値 1) で、OC3 が最も低コストを出すことができるが

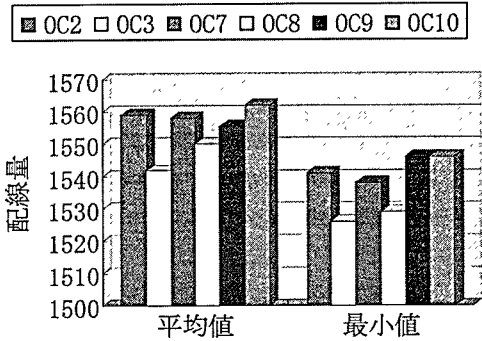


図8 設定値 2) での有効な計算結果の比較

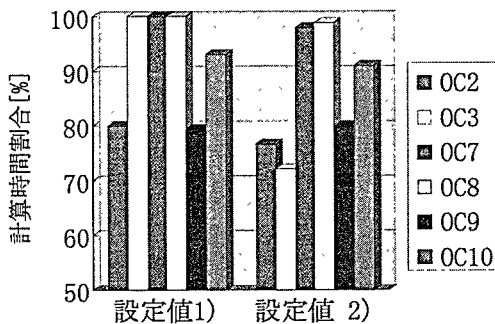


図9 設定値 1) と 2) の計算時間の比較

時間がかかる。

OC3に次いでOC2が低コストを短時間で出すことができたことが分かった(図7と図9)。

Noutを多くした設定値2)では、OC3が最も低コストを出すことができ、なおかつ計算時間もかからない有効な冷却過程であることが分かった(図8と図9)。計算時間を比較すると、全体の計算回数は同じでもNoutを多くしたものの方が解収束が早く計算時間が短縮されやすく、短縮度合いも大きいことが分かった(図9)。

6. まとめと今後の展望

本論文では配線量の少ない回路配置状態を短い時間で求めるためのSAアルゴリズム用の新たな終了条件を提案して有効な手段であることを示した。また、10種類の冷却過程を対象に良質な設定も明確した。今回の検討

では、対象回路は439セルの回路のみであったため、規模の違う回路でも同じ結果となるかを検討する必要がある。また、初期温度は1000で一定していたが、これを違う値にした場合の結果の違いは検討に含まなかった。解の改良と改悪が効率よく行われる温度領域の検討を行うことで、さらに計算時間の短縮や低コストの解を得ることが可能であると考えられるため、これは今後の課題として残される。

参考文献

- [1] S. Kirkpatrick, Jr. C. Gelatt, and M. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing," Science, Vol. 220, No. 4598, pp.671-680, May 1983.
- [2] N. Metropolis, A. Rosenbluth, M. Rosenbluth, A. Teller, and E. Teller, "Equation of State Calculations by Fast Computing Machines," Journal of Chemical Physics, Vol.21, pp. 1087-1092, 1953.
- [3] E. Aarts and J. Korst, "Simulated Annealing and Boltzmann Machines," John Wiley & Sons, 1989.
- [4] C.Beebe, J.D. Carothers, and A. Ortega, "Object-Oriented Thermal Placement Using Accurate Heat Model," Proceedings of the 32nd. Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 1-10, 1999.
- [5] 三木光範、廣安知之、笠井成之、"連続最適化問題への温度並列シミュレーテッドアニーリングの応用、情報処理学会論文誌、Vol.41、No.5、pp.1607-1616、2000。
- [6] 深澤大生、アルベルト・パラシオス・パウロブスキ、"集積回路配置問題へのシミュレーテッド・アニーリング法の適用についての検討" 桐蔭論叢、第11号、pp.341-348、2004年6月。
- [7] Johannes Grad, <http://www.ece.iit.edu/~jgrad/>
- [8] Brian T. Luke, <http://members.aol.com/btluke/simanf1.htm>