

# シミュレーテッドテンパリングによる 電子部品実装順序の最適化

## OPTIMIZATION OF ELECTRONIC COMPONENT MOUNTING ORDER BY SIMULATED TEMPERING

中村 将人

Masato NAKAMURA

指導教員 平原 誠

法政大学大学院理工学研究科応用情報工学専攻修士課程

The problem of combinatorial optimization is to find the optimal solution from all feasible solutions. A typical example is the travelling salesman problem that belongs to a class called NP-complete problems. For these problem, simulated annealing and simulated tempering are very effective and practical algorithms. In this study, the performance of simulated annealing was compared with that of simulated tempering through the optimization of the electronic component mounting order. The validity of simulated tempering was demonstrated via numerical experimentation.

**Key Words :** Simulated tempering, Simulated annealing, Optimization

### 1. はじめに

シミュレーテッドアニーリング[1]は組合せ最適化問題の解法として、よく用いられる。この方法の性能向上のために、高温から冷却し、また上昇させるシミュレーテッドテンパリングが提案されている[2]。

本研究では表面実装機の電子部品実装順序を組合せ最適化問題として捉え、全部品実装までにアームが移動する総移動距離を出来るだけ短くすることを通じて、シミュレーテッドテンパリングの有効性を議論する。

### 2. 表面実装機

#### 2. 1 表面実装機とは

表面実装とは電子部品をプリント基板に実装する技術である。1960 年代に開発され、現在ではほとんどの製品の電子回路で採用されている。電子部品の実装には表面実装機（チップマウンター）と呼ばれる専用装置を使うか、人が直接ピンセットを使って行うこともある。

本研究が対象とする表面実装機（図 1）は、4 本のノズル（赤）を持ったアーム（黄）と、部品を供給するカセット 8 つ（緑）から構成される。表面実装機では、カセットから供給された部品を、アームに取り付けられたノズルで吸着し、それを基板の目的の位置（青）へ装着するという作業が繰り返される。

実装の前に、部品の吸着順、装着順、ノズル番号を予め決めておく必要がある。各カセットの間隔をノズルの間隔と同じにしたため、部品の吸着順序によっては、カ

セットから供給される部品の同時吸着も可能である。従って、部品の吸装着順やノズル番号を最適化することにより、アームの移動距離が最小化され、生産性向上に結びつく。

#### 2. 2 電子部品実装における距離計算の方法

各部品には、部品番号、基板上のx座標値・y座標値、カセット番号を与えておく。アームが1度に吸装着できる部品の数は、ノズルの本数4本と同じ4つまでであり、その実装の1つの単位を1タスクと呼ぶことにする。

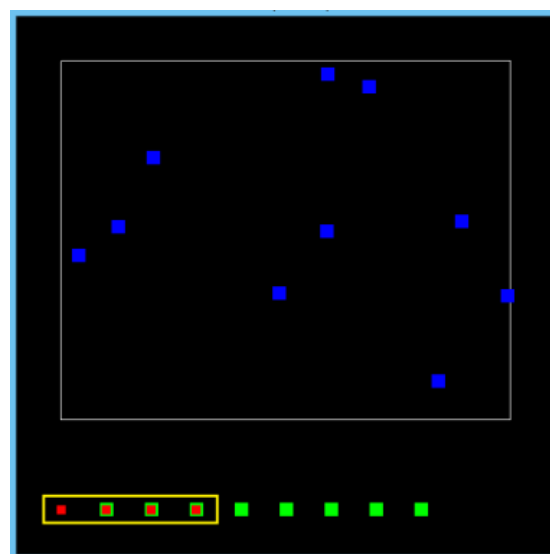


図 1 表面実装機の例

ピタゴラスの定理を用いて、①原点から部品を吸着する際のカセット上でのアームの移動距離、②部品を吸着する際のカセット上でのアームの移動距離、③カセットから基板上の部品の位置までの移動距離、④基板上でのアームの移動距離、⑤基板上から次のタスクの部品のカセットまでの移動距離、⑥全ての部品を置き終わって原点に戻るまでの移動距離の 6 パターンについて移動距離計算を行う。

それぞれの移動距離の計算式を以下に示す。ここで、原点の座標値を0、部品aの基板上での座標値を $p(a)$ 、部品aを供給したカセットの座標値を $C(a)$ 、i番目のノズルの位置座標値を $N(i)$ 、x軸方向の直線距離を $dx(x1,x2)$ 、y軸方向の直線距離を $dy(y1,y2)$ 、部品の吸着順(i番目に吸着する部品)を $A_i$ 、部品の装着順(i番目に装着する部品)を $M_i$ 、部品aを吸装着するノズル番号を $Nn_a$ とする。

- ① 原点から部品を吸着する際のカセット上でのアームの移動距離 (1 タスク目のみ)

$$|dx(C(A_1), N(Nn_{A_1}))| \quad (1)$$

- ② 部品を吸着する際のカセット上でのアームの移動距離

$$\sum_{i=1}^3 |(dx(C(A_{i+1}), C(A_i)) - dx(N(Nn_{A_{i+1}}), N(Nn_{A_i})))| \quad (2)$$

- ③ カセットから基板上の部品の位置までの移動距離

$$\begin{aligned} & \sqrt{t_1^2 + dy(P(M_1), O)^2} \\ t_1 &= dx(P(M_1), N(Nn_{M_1})) \end{aligned} \quad (3)$$

- ④ 基板上でのアームの移動距離

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^3 \sqrt{t_{i+1}^2 + dy(P(M_{i+1}), P(M_i))^2} \\ t_{i+1} &= dx(P(M_{i+1}), N(Nn_{M_{i+1}})) \end{aligned} \quad (4)$$

- ⑤ 基板上から次のタスクの部品のカセットまでの移動距離

$$\begin{aligned} & \sqrt{t_5^2 + dy(Cy(A_1), Py(M_4))^2} \\ t_5 &= dx(P(M_4), C(A_1)) \\ & - dx(N(Nn_{M_4}), N(Nn_{A_1})) \end{aligned} \quad (5)$$

- ⑥ 全ての部品を置き終わって原点に戻るまでの移動距離 (最終タスクのみ)

$$\sqrt{dx(N(n_1), O)^2 + dy(N(n_1), O)^2} \quad (6)$$

これらの処理をタスクの回数分繰り返すことにより、アームの総移動距離を求める。

従って、本研究で扱う電子部品実装順序の最適化問題では、解 $x$ は吸着順 $\{A_1, \dots, A_p\}$ 、装着順 $\{M, \dots, M_p\}$ 、ノズル番号 $\{Nn_1, \dots, Nn_p\}$ によって定まり、コスト関数 $f(x)$ はアームの移動距離となる。

### 3. シミュレーテッドアニーリング : SA

SA は組合せ最適化問題の解法としてよく用いられる。この方法は解探索に温度という概念を取り入れ、確率的に敢えて改悪解に移動することで改悪解からの脱出を試みるものである。

コスト関数 $f(x)$ の最適解を求める一般的な SA のアルゴリズムは以下ようになる。

- ① 乱数を用いて作成した部品の吸装着順・ノズル番号から、初期解 $x$ を生成する。また、初期温度 $T$ を設定する。
- ② ランダムに 2 つ部品を選び、部品の吸装着順・ノズル番号を入れ替えることによって解 $x'$ を生成する。
- ③ 解 $x'$ でのアームの総移動距離を $f(x')$ 、解 $x$ でのアームの総移動距離を $f(x)$ とし、 $\Delta = f(x') - f(x)$ とする。
- ④  $\Delta \leq 0$ ならば確率1で、そうでなければ確率 $e^{-\frac{\Delta}{T}}$ で解 $x'$ を受理する (図 2)。ここで受理確率 $p(\Delta)$ は以下のように記述することが出来る。

$$p(\Delta) = \begin{cases} 1, & \Delta \leq 0 \text{ (改善解の場合)} \\ e^{-\frac{\Delta}{T}}, & \Delta > 0 \text{ (改悪解の場合)} \end{cases} \quad (7)$$

- ⑤ 終了条件が満たされれば暫定解 $x$ を出力して探索を終了する。そうでなければ以下のように温度 $T$ を冷却率 $\alpha$ により更新した後ステップ②に戻る。

$$T \leftarrow \alpha T, 0 < \alpha < 1 \quad (8)$$

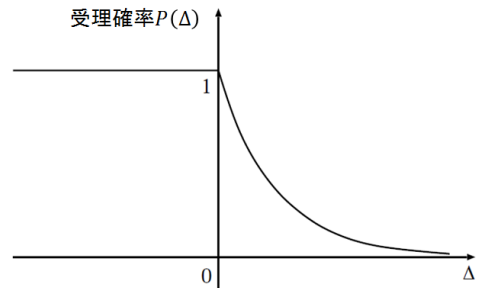


図 2 SA における解の受理確率

解探索が進むにつれて、徐々に温度  $T$  は冷却率  $\alpha$  により単調減少していくので、最終的には改悪解の受理確率は限りなく 0 に近づく (図 3)。

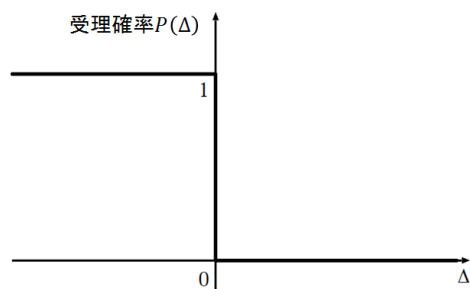


図 3 温度  $T$  が限りなく 0 に近い場合

#### 4. シミュレーテッドテンパリング : ST

ST は焼き戻しを模倣した新しいヒューリスティックサーチである。ST のアルゴリズムを図 4 に示す。

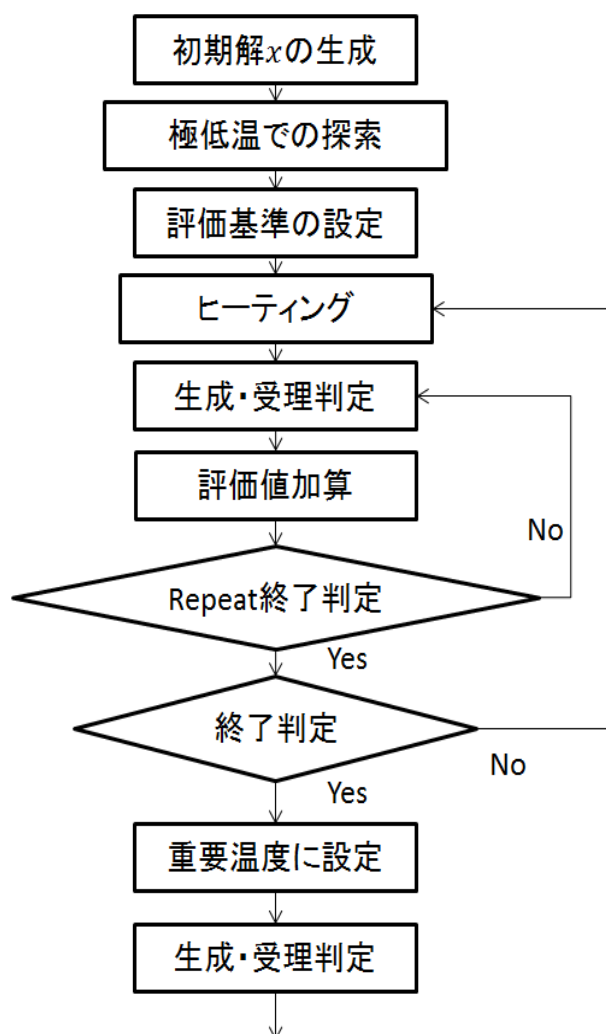


図 4 ST のアルゴリズム

処理の前半に極低温での解探索 (生成・受理判定) で局所解  $x_0$  に収束させるため、非常に早い段階で最適解に近づくことが大きな特徴である。

また、極低温での処理によって求められた局所解  $x_0$  のコスト  $f(x_0)$  を評価基準とし、予め設定された温度の各々で解探索を行い、解探索中にその評価基準  $f(x_0)$  を下回るコストの解  $x$  の受理に対して、相応の評価値  $f(x_0) - f(x)$  を加算する。頻繁に評価基準を下回る重要温度付近の評価値は高くなるので、自動的に重要温度を求めることが出来るのも大きな特徴である (図 5)。

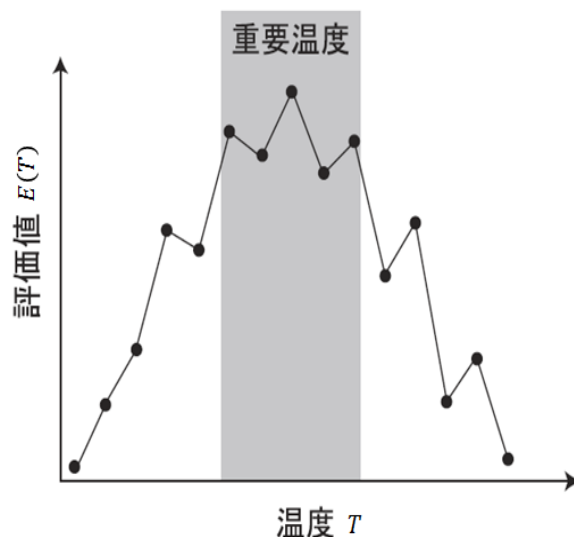


図 5 各温度における評価値

温度ごとの評価値の分布が得られたら、その時点で処理を中断し、その分布の中で評価値が最も高い温度 (重要温度) で処理を続け、終了条件が満たされれば暫定解  $x$  を出力して探索を終了する。

#### 5. 実験

電子部品実装順序の最適化を行うことにより、SA と ST の有効性を比較する。SA・ST の計算回数を同じにし、実験を行った。

部品の個数  $P$  が 10 (タスク数 3), 50 (タスク数 13), 100 (タスク数 25) の問題をそれぞれ 5 問ずつ用意した (図 6)。ここで、部品の座標値、カセット番号などは、乱数を用いて作成した。

また、吸着順  $A_i$ , 装着順  $M_i$ , ノズル番号  $Nn_a$  の初期値は乱数を用いて作成した。SA・ST とともに乱数の seed を変え 10 回試行し、その中の最小コストと平均コストを比較した。

SA では、事前のパイロット実験により、初期温度  $T=40$ , 冷却率  $\alpha = 0.999$  に設定した。

ST では重要温度に設定し一定時間処理を行った後、冷却率  $\alpha = 0.999$  を用いて、解を収束させた。

#### 6. 実験結果

部品数 10, 50, 100 のそれぞれの問題に対する最小コストと平均コストを表 1 に示す。SA と ST を比較し、コストが小さい方を赤で示している。

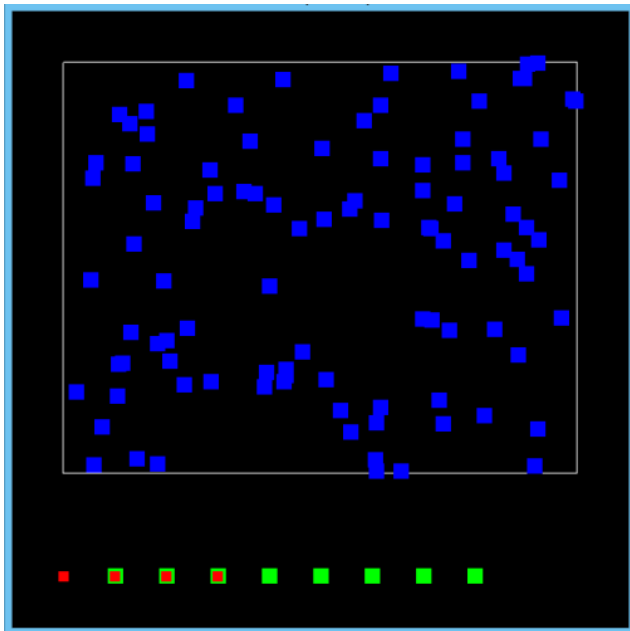


図 6 問題の一例 (部品数 P=100)

表 1 実験結果 ST・SA の比較

部品数	問題	最小コスト		平均コスト	
		SA	ST	SA	ST
10	①	6.40	6.40	6.72	6.72
	②	6.41	6.41	6.59	6.67
	③	6.38	6.38	6.69	6.61
	④	5.98	5.98	6.23	6.05
	⑤	6.45	6.45	6.70	6.81
50	①	21.36	21.57	22.33	22.11
	②	22.53	21.92	23.15	22.57
	③	22.21	22.46	23.16	23.08
	④	24.02	23.57	24.58	24.20
	⑤	23.45	23.25	23.90	23.86
100	①	45.28	44.69	45.70	45.38
	②	43.35	43.49	44.42	44.20
	③	43.29	42.77	44.15	43.82
	④	44.57	43.32	45.40	44.78
	⑤	45.46	44.18	46.04	45.34
対応のあるt検定 P値		0.0387		0.0023	

表 1 より、部品数 10 の最小コストでは、SA と ST にコストの差は見られなかった。しかし、部品数 10 の平均コスト、部品数 50 と部品数 100 の最小コスト・平均コストでは、ST を用いたほうが、コストが小さい傾向にあった。また、対応のある t 検定を行った結果、P 値が 5% 以下であることから、有意差があることが確認できた。従って、ST の有効性が示されたといえる。

## 7. 考察

SA には長所として、「局所解に陥りにくい」などがある。しかしながら、温度 T や冷却率  $\alpha$  に大きく依存しており、任意の問題に対する一般的な温度スケジュールは明らかになっていない。このため、問題ごとに最適な温度スケジュールを設定することが非常に難しいという欠点がある。

これに対して ST は、温度ごとの評価値を用いた重要温

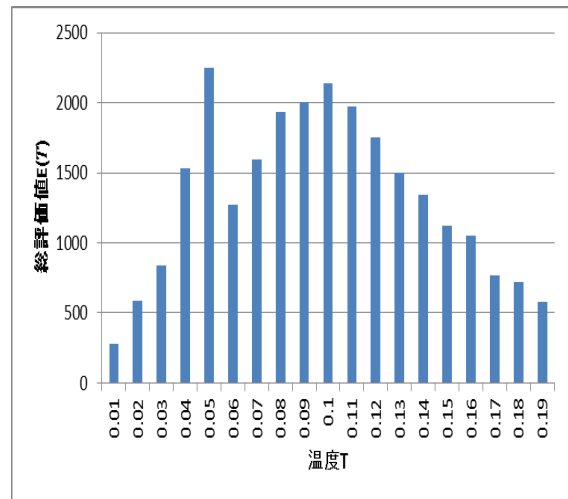


図 7 単峰性にならなかった評価値分布の例

度の自動探索を行うことにより、より効率的な解探索が実現された。従って、表 1 のように ST の有効性が確認できる結果となったと考えられる。

## 8. 今後の課題

ST の計算回数が十分多い場合は、評価値の分布が単峰性になったことに対して、十分でなかった場合は、図 7 のように評価値の分布が単峰性にならなかった。従って、最大評価値の温度を重要温度とする単純な方法では、真の重要温度からかけ離れてしまう可能性がある。これは温度ごとの評価値の分布に対して正規分布による近似を行うことにより、計算回数が少なくても最適な重要温度を求めることが出来ると考えられる。

本研究の表面実装機では、部品の高さや大きさなどを考慮していない。実際の表面実装機では、大きな部品から実装すると、アームやノズルがそれらとぶつかってしまう危険性があり、小さな部品から実装する必要がある。従って、これらを考慮することによって、実際の表面実装機のシミュレーションにより近づけることが出来ると考えられる。

謝辞：本研究を進めるにあたり、ご指導を頂いた修士論文指導教員の平原誠准教授に感謝致します。また、日常の議論を通じて多くの知識や示唆を頂いた脳情報処理研究室の皆様に感謝します。

## 参考文献

- [1] Kirkpatrick, S., Gelett Jr. C. D., and Vecchi, M. P.: Optimization by Simulated Annealing, Science, Vol. 220, No. 4598, pp. 671-680, 1983.
- [2] 三木光範, 廣安知之, 吉田武史, 窪田耕明, 小野景子: 進化的シミュレーテッドテンパリング-新しいヒューリスティックサーチ, 電子情報通信学会技術報告, Vol.101, No. 66, pp.47-54, 2001.