

2014 年度 修士論文

論文題名 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

指導教員 平原 誠

大学院理工学研究科  
応用情報工学専攻修士課程

13R4121

ナカムラ マサト  
氏名 中村 将人

# 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

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

ナカムラ マサト

13R4121 中村 將人

---

# OPTIMIZATION OF ELECTRONIC COMPONENT MOUNTING ORDER BY SIMULATED TEMPERING

MasatoNakamura

## 概要

組合せ最適化問題は、全ての実行可能解から最適解を求める問題である。代表的な例は、NP 完全問題と呼ばれるクラスに属する巡回セールスマン問題などがある。これらの組合せ最適化問題の解法として、シミュレーテッドアニーリングとシミュレーテッドテンパリングのような効果的で実用的なアルゴリズムがある。本研究では、電子部品実装順序の最適化を通じて、シミュレーテッドアニーリングとシミュレーテッドテンパリングの性能を比較した。数値実験により、シミュレーテッドテンパリングの有効性が示された。

## Abstract

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.

## 目次

第1章 序論 .....	1
1.1. 研究背景 .....	2
1.2. 研究目的 .....	2
第2章 表面実装機 .....	3
2.1. 表面実装機とは .....	4
2.2. 電子部品実装における距離計算の方法 .....	5
第3章 シミュレーテッドアニーリング (Simulated Annealing : SA) .....	8
第4章 シミュレーテッドテンパリング (Simulated Tempering : ST) .....	14
第5章 実験方法 .....	18
第6章 実験結果 .....	21
第7章 結論 .....	26
7.1. 考察 .....	27
7.2. 今後の課題 .....	28
謝辞 .....	30
参考文献 .....	32
付録 .....	34

# 第 1 章 序論

# 第 1 章 序論

## 1.1. 研究背景

現代社会において、メタ戦略を用いた組合せ最適化問題の求解が多く研究されている。また、組合せ最適化問題として捉えることが出来るものも数多く存在しており、郵便配達経路の最適化やトラックの荷積みの最適化など実用的な問題も研究されてきた。

これらの研究には、主にメタ戦略の 1 つであるシミュレーテッドアニーリングが用いられていることが多い。しかしながら、シミュレーテッドアニーリングで得られる解は「温度」と呼ばれる制御パラメータ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。従って、ユーザーが最適な温度スケジュールを問題ごとに設定する必要がある、経験と勘を要する。

大域的最適解を求める新しい最適化手法も多く研究されており、シミュレーテッドアニーリングの性能向上のために、高温度から冷却し、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。メタ戦略による組合せ最適化問題の求解に対する研究は日々進化していると言える。

## 1.2. 研究目的

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る。全部品実装までにアームが移動する総移動距離をコスト関数とした組合せ最適化問題を通じて、シミュレーテッドアニーリングとシミュレーテッドテンパリングの有効性を比較し、議論することを目的とする。

表面実装機の電子部品実装順序の最適化は、他の組合せ最適化問題と比較して、あまり研究されていないため、本研究の研究対象とした。



## 第 2 章

# 表面実装機

## 第 2 章 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、部品の吸着順や装着順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。

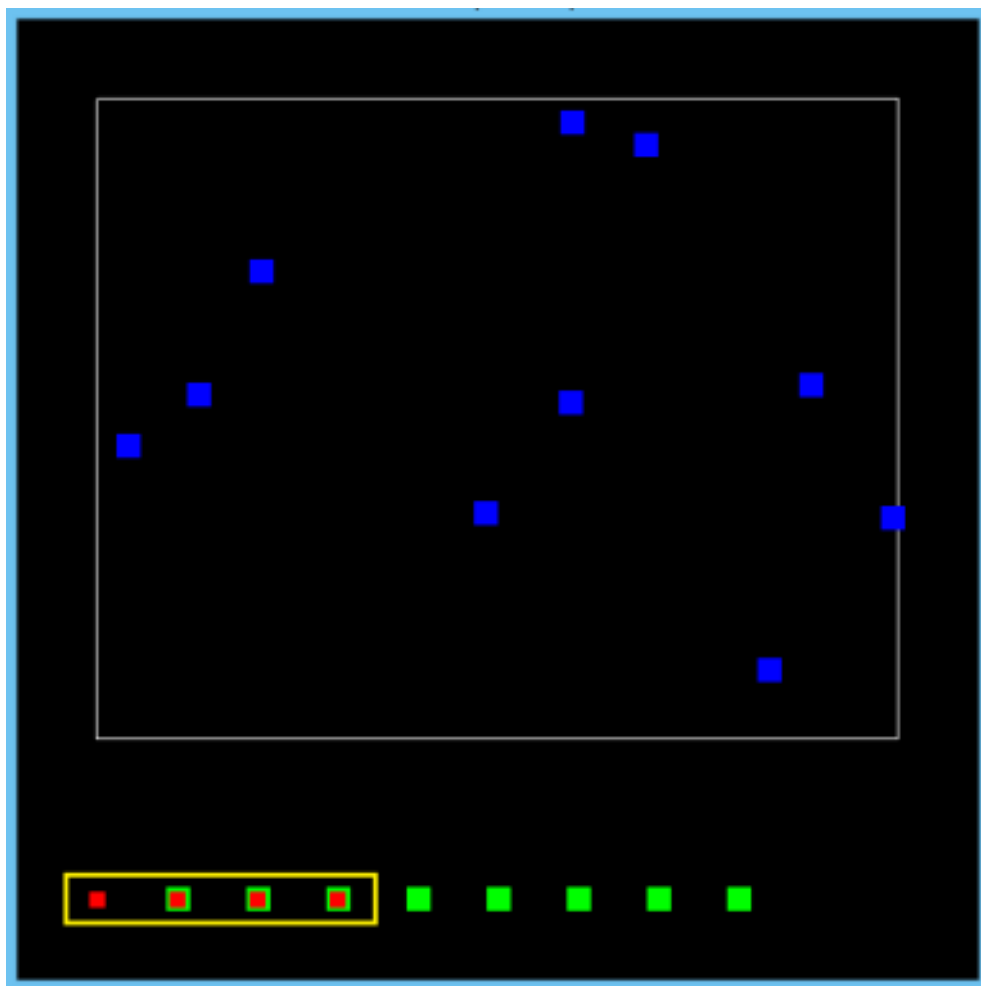


図 1 表面実装機の例

## 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，ノズルの本数 4 本と同じ 4 つまでであり，図 2 のようにその実装の 1 つの単位を 1 タスクと呼ぶことにする．

ノズル番号 $Nn$		1	2	3	4
1タスク		$a$	$b$	$c$	$d$
2タスク		$e$	$f$	$g$	$h$
⋮				⋮	

図 2 タスクの説明

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

$$\sqrt{dx(P(M_1), N(Nn_{M_1}))^2 + dy(P(M_1), O)^2} \quad (3)$$

④ 基板上でのアームの移動距離

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

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

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

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 $\mathbf{x}$ は、図 3 のように吸着順 $\{A_1, \dots, A_P\}$ 、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 $f(\mathbf{x})$ はアームの総移動距離となる。

図 3 の第 1 タスクでは、ノズル番号 1, 2, 3, 4 でそれぞれ部品 d, c, b, a を取扱い、部品 a, b, c, d の順で吸着し、部品 b, a, d, c の順で装着することを意味している。

	吸着順 $A_i$			
	1	2	3	4
第1タスク	$a$	$b$	$c$	$d$
第2タスク	$e$	$f$	$g$	$h$
$\vdots$		$\vdots$		
	装着順 $M_i$			
	1	2	3	4
第1タスク	$b$	$a$	$d$	$c$
第2タスク	$f$	$e$	$h$	$g$
$\vdots$		$\vdots$		
	ノズル番号 $Nn$			
	1	2	3	4
第1タスク	$d$	$c$	$b$	$a$
第2タスク	$h$	$g$	$f$	$e$
$\vdots$		$\vdots$		

図 3 吸着順, 装着順, ノズル番号からなる解 $\mathbf{x}$ の例

## 第 3 章

シミュレーテッドアニーリング

Simulated Annealing : SA

## 第3章 シミュレーテッドアニーリング

### Simulated Annealing : SA

シミュレーテッドアニーリング (Simulated Annealing : SA) は, 現在の解 $x$ と近傍解 $x'$ に対し, コスト関数 $f(x)$ を用いてコストの差異を求めて, それに応じた受理確率 (良い解ほど受理しやすい) で次の解を選ぶ. 近傍解 $x'$ が改悪解であっても受理する確率を与えることで, 局所最適解からの脱出を図るものである. 受理確率は, 物理現象の焼きなまし (annealing) にアイデアを借りて, 温度 (temperature) と呼ばれるパラメータ  $T$  ( $T > 0$ ) により調整される.

アームの総移動距離であるコスト関数 $f(x)$ の最適解を求める SA のアルゴリズムは以下のようになる.

- 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近傍解 $x'$ を生成する. 同タスクの部品 $a$ と部品 $d$ が選ばれた場合の部品の吸装着順・ノズル番号入れ替え例を図 4, 別タスクの部品 $a$ と部品 $h$ が選ばれた場合の部品の吸装着順・ノズル番号入れ替え例を図 5 に示す. それぞれ同様に, 部品の吸装着順・ノズル番号を全て同時に入れ替える操作を行っている.
- ③ 近傍解 $x'$ と解 $x$ でのアームの総移動距離をそれぞれ $f(x')$ ,  $f(x)$ 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 $e^{\frac{-\Delta}{T}}$ で近傍解 $x'$ を受理する (図 6). 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.

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

		吸着順 $A_i$						装着順 $M_i$			
		1	2	3	4			1	2	3	4
第1タスク		<b>a</b>	b	c	<b>d</b>	第1タスク		b	<b>a</b>	<b>d</b>	c
第2タスク		e	f	g	h	第2タスク		f	e	h	g
⋮				⋮		⋮			⋮		

		ノズル番号 $Nn$			
		1	2	3	4
第1タスク		<b>d</b>	c	b	<b>a</b>
第2タスク		h	g	f	e
⋮				⋮	

部品の吸装着順・ノズル番号入れ替え



		吸着順 $A_i$						装着順 $M_i$			
		1	2	3	4			1	2	3	4
第1タスク		d	b	c	a	第1タスク		b	d	a	c
第2タスク		e	f	g	h	第2タスク		f	e	h	g
⋮				⋮		⋮			⋮		

		ノズル番号 $Nn$			
		1	2	3	4
第1タスク		a	c	b	d
第2タスク		h	g	f	e
⋮				⋮	

図 4 同タスクの部品**a**と部品**d**が選ばれた場合の部品の吸装着順・ノズル番号入れ替え例



吸着順 $A_i$					装着順 $M_i$				
	1	2	3	4		1	2	3	4
第1タスク	<span style="border: 1px solid red; border-radius: 50%; padding: 2px;">a</span>	b	c	d	第1タスク	b	<span style="border: 1px solid red; border-radius: 50%; padding: 2px;">a</span>	d	c
第2タスク	e	f	g	<span style="border: 1px solid red; border-radius: 50%; padding: 2px;">h</span>	第2タスク	f	e	<span style="border: 1px solid red; border-radius: 50%; padding: 2px;">h</span>	g
⋮			⋮		⋮			⋮	

ノズル番号 $Nn$				
	1	2	3	4
第1タスク	d	c	b	<span style="border: 1px solid red; border-radius: 50%; padding: 2px;">a</span>
第2タスク	<span style="border: 1px solid red; border-radius: 50%; padding: 2px;">h</span>	g	f	e
⋮			⋮	

部品の吸装着順・ノズル番号入れ替え



		吸着順 $A_i$						装着順 $M_i$			
		1	2	3	4			1	2	3	4
第1タスク		$h$	$b$	$c$	$d$	第1タスク		$b$	$h$	$d$	$c$
第2タスク		$e$	$f$	$g$	$a$	第2タスク		$f$	$e$	$a$	$g$
$\vdots$			$\vdots$			$\vdots$			$\vdots$		

		ノズル番号 $Nn$			
		1	2	3	4
第1タスク		$d$	$c$	$b$	$h$
第2タスク		$a$	$g$	$f$	$e$
$\vdots$			$\vdots$		

図 5 別タスク部品**a**と部品**h**が選ばれた場合の部品の吸装着順・ノズル番号入れ替え例

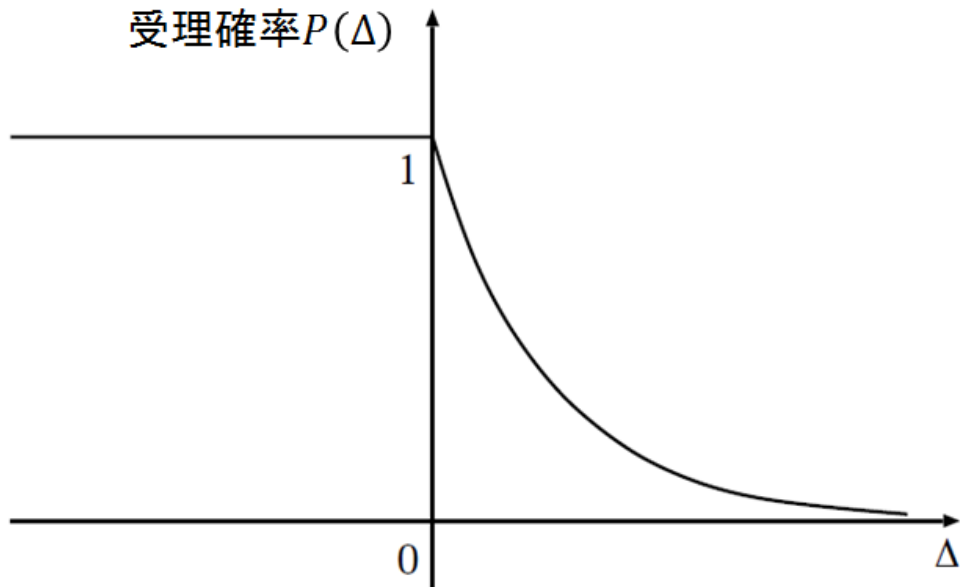


図 6 SA における解の受理確率

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 7）．

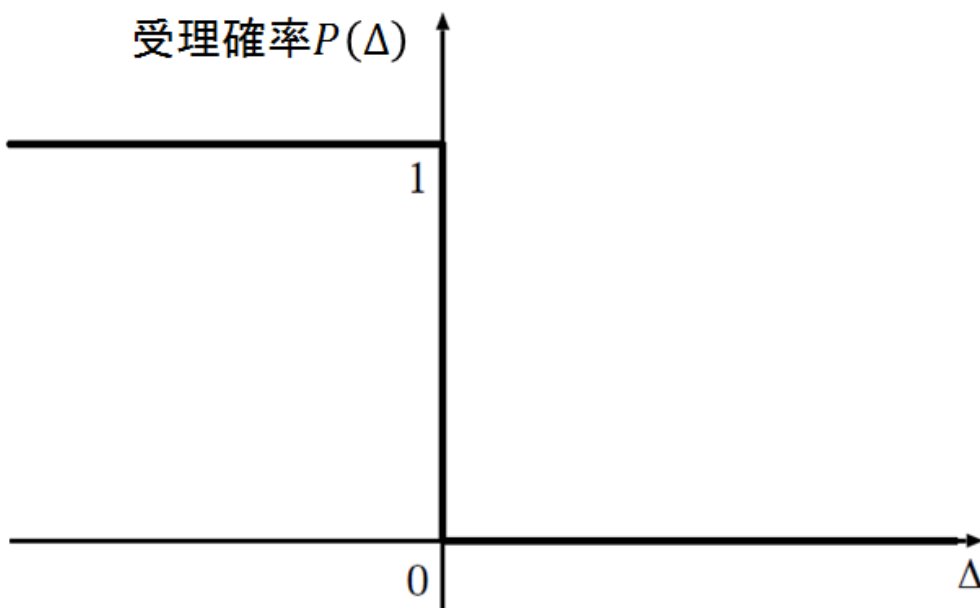


図 7 温度  $T$  が限りなく 0 に近い場合

SA の長所として，「局所解に陥りにくい」 ことなどがある．

図 8 左のような改善解のみを受理する通常の単純局所探索法では，初期値の与え方によって局所最適解に陥りやすい．これに対して図 8 右のような SA では，改悪方向へも解の探索を進めることで局所最適解からの脱出を図り，より良い大域的最適解に到達できる可能性がある．

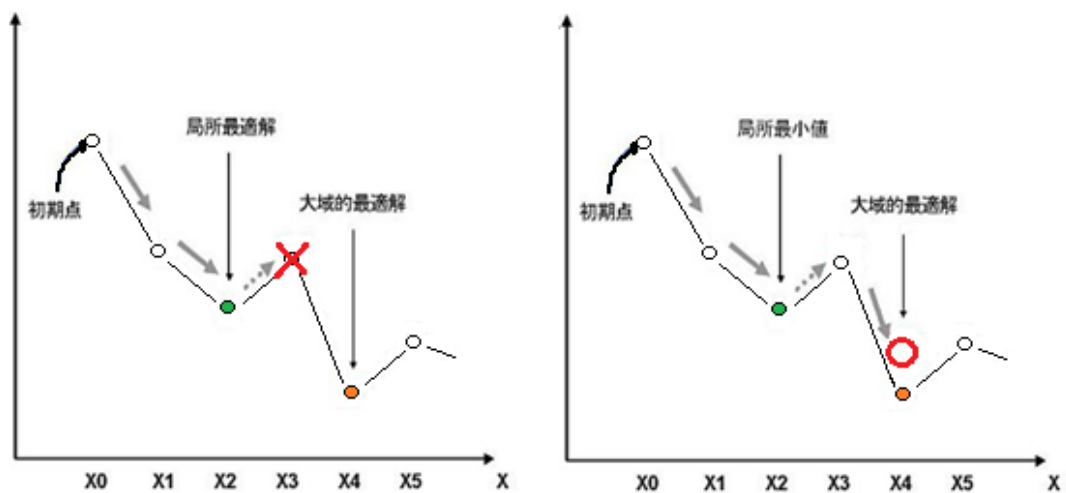


図 8 単純局所探索法（左）と SA（右）の解探索の比較

しかしながら, SA は式(8)のような温度  $T$  や冷却率  $\alpha$  などの制御パラメータ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必要がある, これには膨大な時間を要する.

## 第 4 章

シミュレーテッドテンパリング

Simulated Tempering : ST

## 第4章 シミュレーテッドテンパリング

### Simulated Tempering : ST

シミュレーテッドテンパリング (Simulated Tempering : 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。基本的なアルゴリズムは SA とほぼ同じであるが、「極低温での探索」「評価値を用いた重要温度の自動探索」が ST の特徴として挙げられる。

アームの総移動距離であるコスト関数 $f(x)$ の最適解を求める ST のアルゴリズムは以下のようになる (図 9)。

- 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 $T$ を極低温 $T_0$ に設定する。温度リスト $\{T_1, \dots, T_{max}\}$ を作成する。温度ごとの解探索回数  $R$  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、式(7)を用いて極低温 $T_0$ での解探索を行う。ここでの入れ替えも SA と同様図 4 や図 5 のように行う。
- ③極低温 $T_0$ で SA と同様式(7)を用いた解探索によって求められた局所最適解 $x_0$ のコスト $f(x_0)$ を評価基準として設定する。
- ④温度リストの各 $T_i$ について、以下を繰り返し行う。  
温度 $T_i$ で式(7)を用いて  $R$  回解探索を行い、解探索中にその評価基準 $f(x_0)$ を下回るコストの解の受理に対して相応の評価値 $f(x_0) - f(x)$ を加算し、以下のように温度ごとの評価関数を作成する。

$$E(T_i) \leftarrow E(T_i) + (f(x_0) - f(x)) \quad (9)$$

- ⑤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、その分布の中で最も評価値の高い温度を重要温度とする。
- ⑥重要温度で SA と同様式(7)を用いて解探索を行い、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。そうでなければ解探索を続ける。

ST は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 10)。

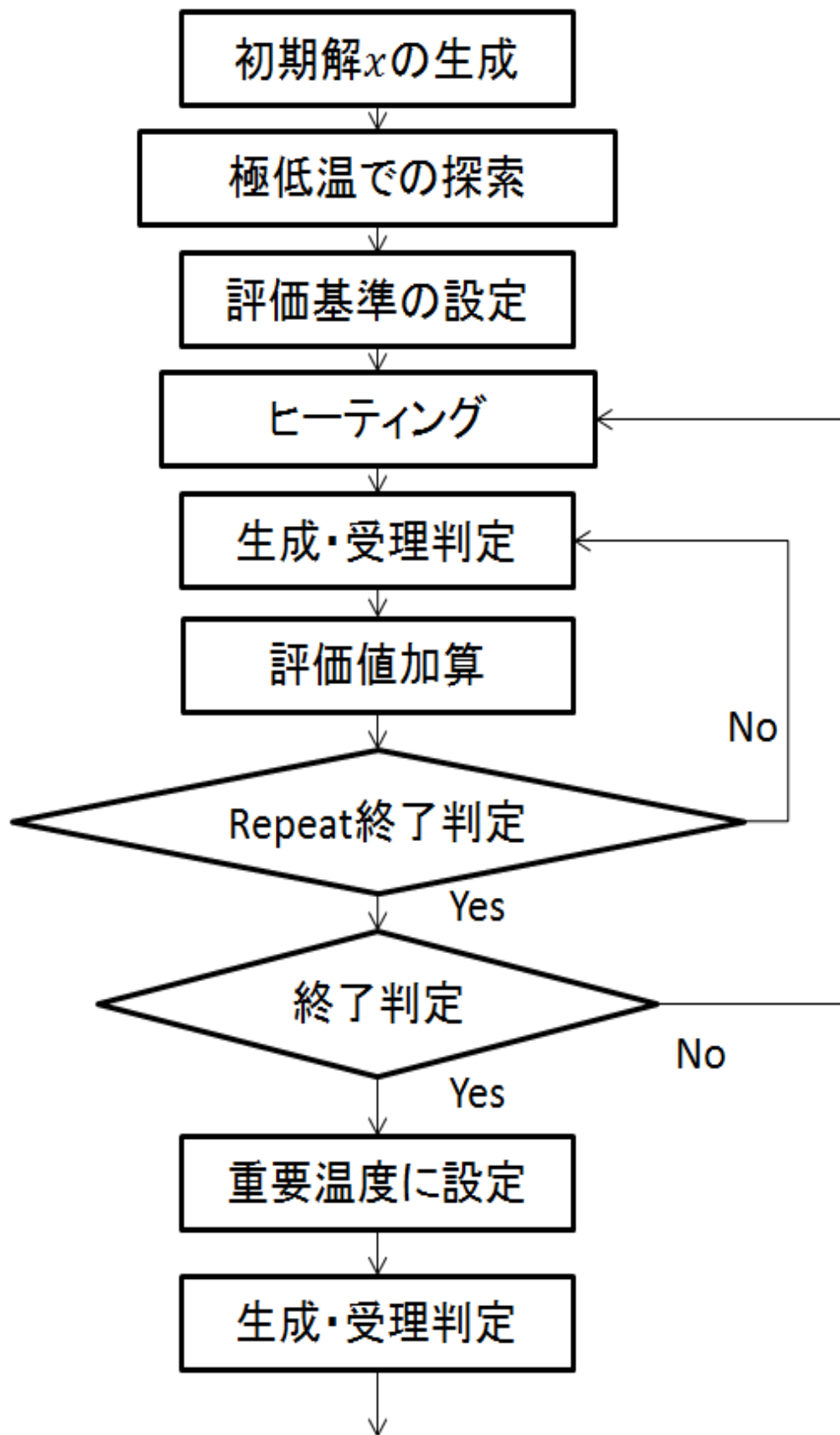


図 9 ST のアルゴリズム

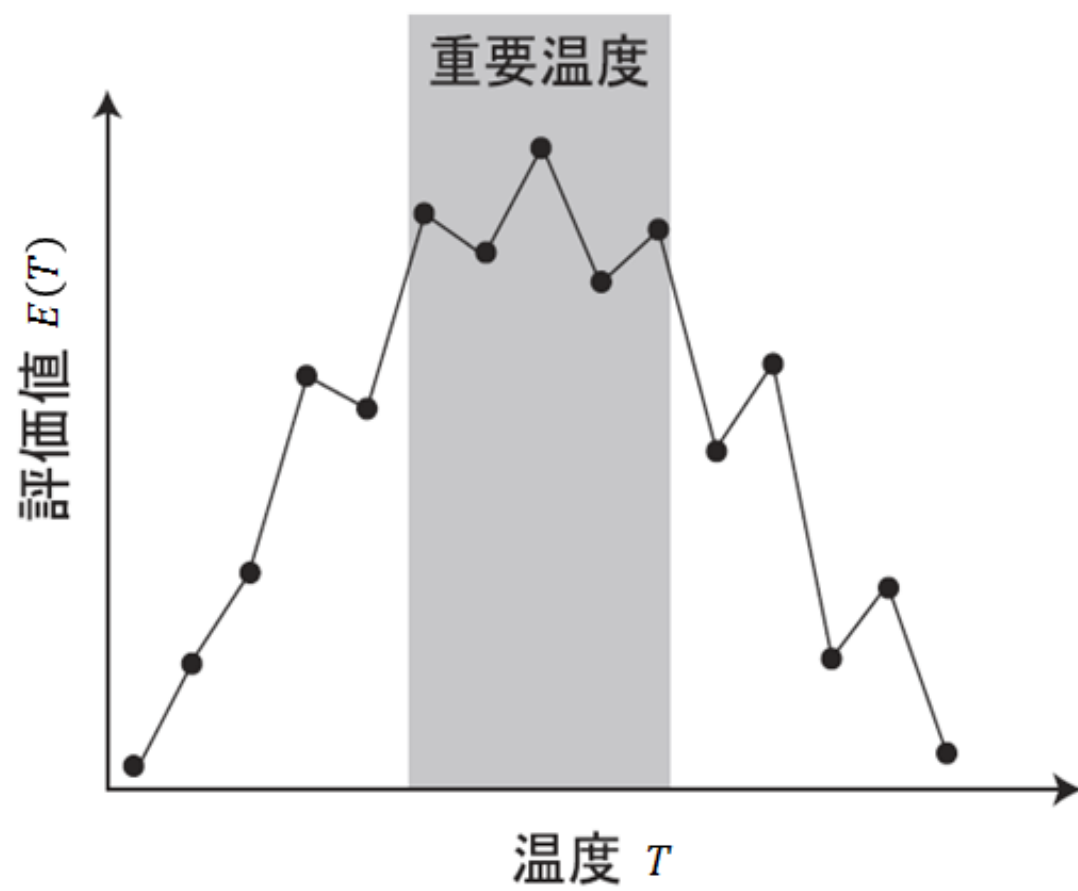


図 10 各温度における評価値

## 第 5 章 実験方法



## 第 5 章 実験方法

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 11～図 13）．ここで，部品の座標，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．また，総計算回数を 7,300,000 回とした．

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．また，温度リスト $\{0.00, 0.01, \dots, 0.18, 0.19\}$ を用意した．極低温での解探索が 300,000 回，温度ごとの解探索回数  $R$  が 300,000 回，冷却率 $\alpha$ を用いた探索 1,000,000 回の総計 7,300,000 回とした．

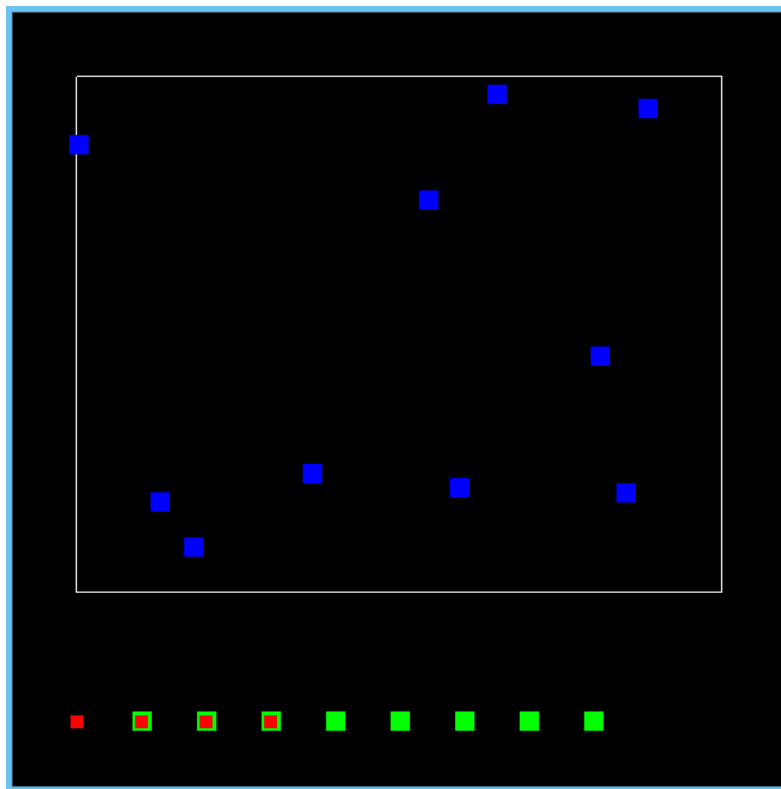


図 11 問題の一例（部品数  $P=10$ ）

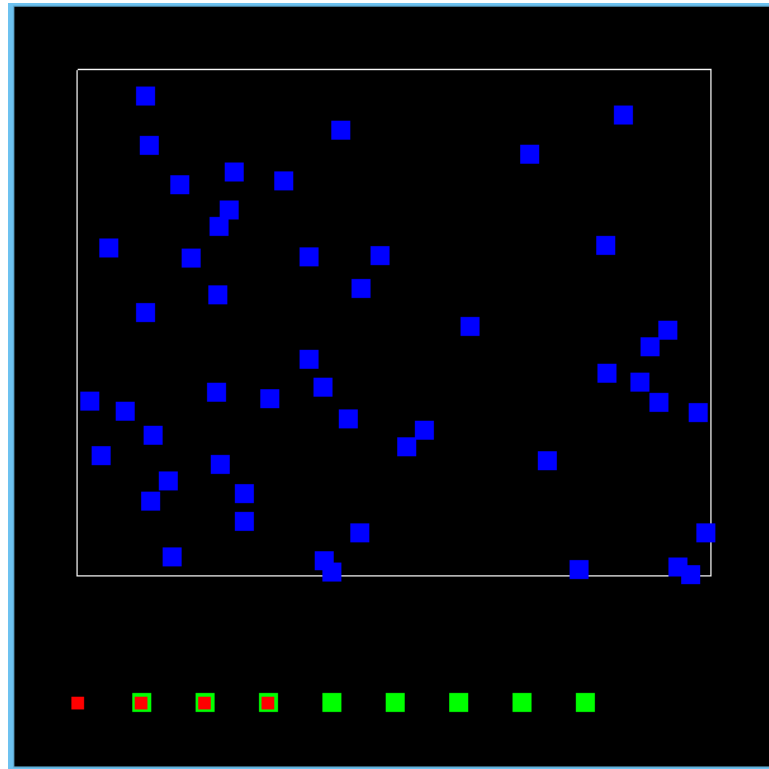


図 12 問題の一例 (部品数  $P=50$ )

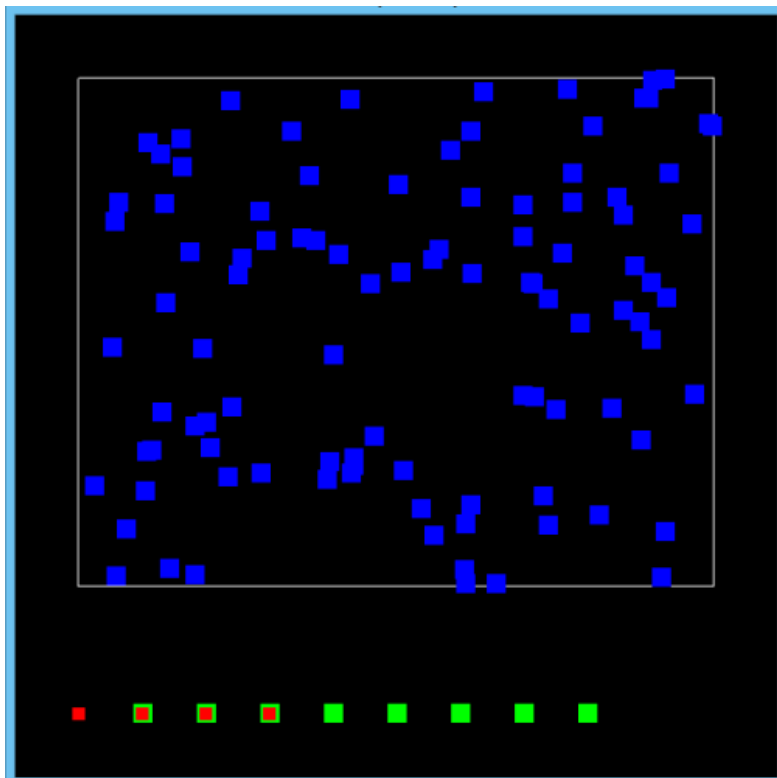


図 13 問題の一例 (部品数  $P=100$ )

## 第 6 章

### 実験結果

## 第 6 章 実験結果

部品数 10, 50, 100 のそれぞれの問題に対して SA を用いて解探索を行ったコスト・最小コスト・平均コスト・標準偏差を表 1 に示す。また、問題ごとの平均コスト・標準偏差のグラフを図 14 に示す。

表 1 SA 実験結果

部品数	問題	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目	9回目	10回目	MIN	AVE	標準偏差
10	①	6.94	6.54	6.64	6.45	6.90	6.74	6.40	6.47	7.06	7.03	6.40	6.72	0.24
	②	6.41	6.55	6.43	6.77	6.65	6.43	6.41	7.11	6.78	6.41	6.41	6.59	0.22
	③	7.10	6.61	6.91	6.40	6.80	6.75	6.80	6.40	6.38	6.78	6.38	6.69	0.23
	④	6.73	5.98	6.17	6.17	6.39	6.02	6.07	6.22	6.02	6.55	5.98	6.23	0.24
	⑤	6.79	6.79	6.46	6.46	6.93	6.45	7.08	6.56	6.94	6.56	6.45	6.70	0.22
50	①	22.85	22.81	22.63	22.54	21.95	22.16	22.63	22.51	21.87	21.36	21.36	22.33	0.46
	②	23.75	23.28	23.93	23.44	23.18	23.14	22.77	22.65	22.83	22.53	22.53	23.15	0.44
	③	24.11	23.63	23.94	23.24	23.13	22.65	22.98	22.21	22.52	23.18	22.21	23.16	0.58
	④	24.38	24.02	24.48	24.72	24.32	25.68	24.53	24.34	24.04	25.26	24.02	24.58	0.50
	⑤	24.10	24.38	23.58	23.77	24.39	23.48	23.45	24.39	23.86	23.62	23.45	23.90	0.36
100	①	45.30	45.61	45.60	46.01	45.28	46.05	46.06	46.00	45.53	45.53	45.28	45.70	0.29
	②	45.00	44.39	43.35	43.49	44.78	43.68	44.87	45.56	45.06	44.01	43.35	44.42	0.71
	③	44.34	44.24	45.10	43.93	44.25	43.29	44.95	43.86	44.12	43.37	43.29	44.15	0.56
	④	45.26	45.74	45.84	44.62	45.09	45.04	46.11	45.81	44.57	45.88	44.57	45.40	0.53
	⑤	46.20	45.66	46.07	45.65	47.00	45.46	45.69	46.51	46.27	45.90	45.46	46.04	0.45

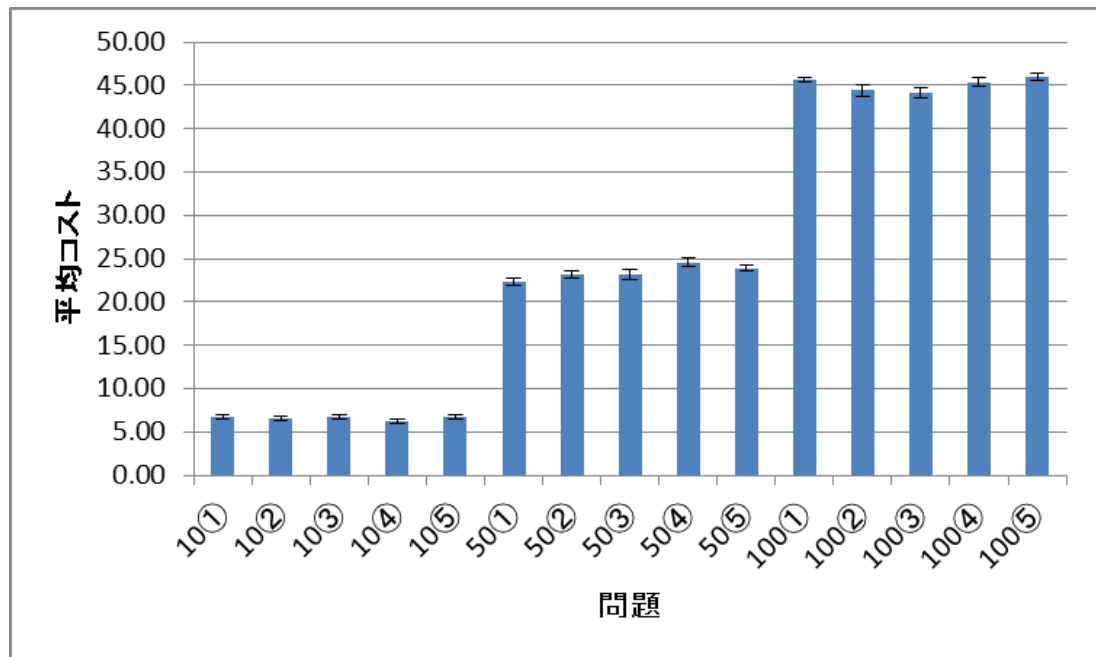


図 14 問題ごとの平均コスト・標準偏差のグラフ (SA)

部品数 10, 50, 100 のそれぞれの問題に対して ST を用いて解探索を行ったコスト・最小コスト・平均コスト・標準偏差を表 2 に示す。また、問題ごとの平均コスト・標準偏差のグラフを図 15 に示す。

表 2 ST 実験結果

部品数	問題	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目	9回目	10回目	MIN	AVE	標準偏差
10	①	6.40	6.70	6.75	6.72	6.95	6.95	6.85	6.54	6.40	6.90	6.40	6.72	0.20
	②	6.55	6.86	6.78	6.41	6.59	6.83	6.77	6.78	6.73	6.41	6.41	6.67	0.16
	③	6.38	6.54	6.50	6.75	6.40	6.40	6.88	6.87	6.66	6.73	6.38	6.61	0.18
	④	6.07	6.07	5.98	5.98	5.98	6.02	6.29	6.02	6.08	5.98	5.98	6.05	0.09
	⑤	6.86	6.69	6.87	6.73	7.00	6.71	7.28	7.03	6.46	6.45	6.45	6.81	0.24
50	①	22.07	21.81	21.62	22.36	21.57	22.71	22.15	22.62	22.31	21.82	21.57	22.11	0.38
	②	22.66	22.60	21.92	22.86	22.73	22.62	22.78	22.08	22.33	23.12	21.92	22.57	0.34
	③	23.48	22.91	22.51	23.18	23.44	22.83	23.43	23.49	22.46	23.04	22.46	23.08	0.37
	④	24.30	24.55	24.24	24.63	24.58	23.76	24.42	24.03	23.87	23.57	23.57	24.20	0.35
	⑤	24.29	23.48	23.69	24.27	23.59	23.84	23.91	24.07	23.25	24.17	23.25	23.86	0.34
100	①	45.90	44.69	45.77	45.50	45.17	45.51	45.70	45.34	45.17	45.07	44.69	45.38	0.35
	②	43.94	44.67	44.25	44.80	43.75	44.20	44.51	44.08	43.49	44.29	43.49	44.20	0.38
	③	44.50	43.72	42.77	43.70	44.58	44.34	43.54	43.61	43.90	43.51	42.77	43.82	0.51
	④	44.65	45.80	43.99	43.32	45.12	44.91	45.09	45.58	44.49	44.82	43.32	44.78	0.69
	⑤	45.69	45.46	44.18	46.29	45.47	46.77	44.79	44.51	45.09	45.15	44.18	45.34	0.74

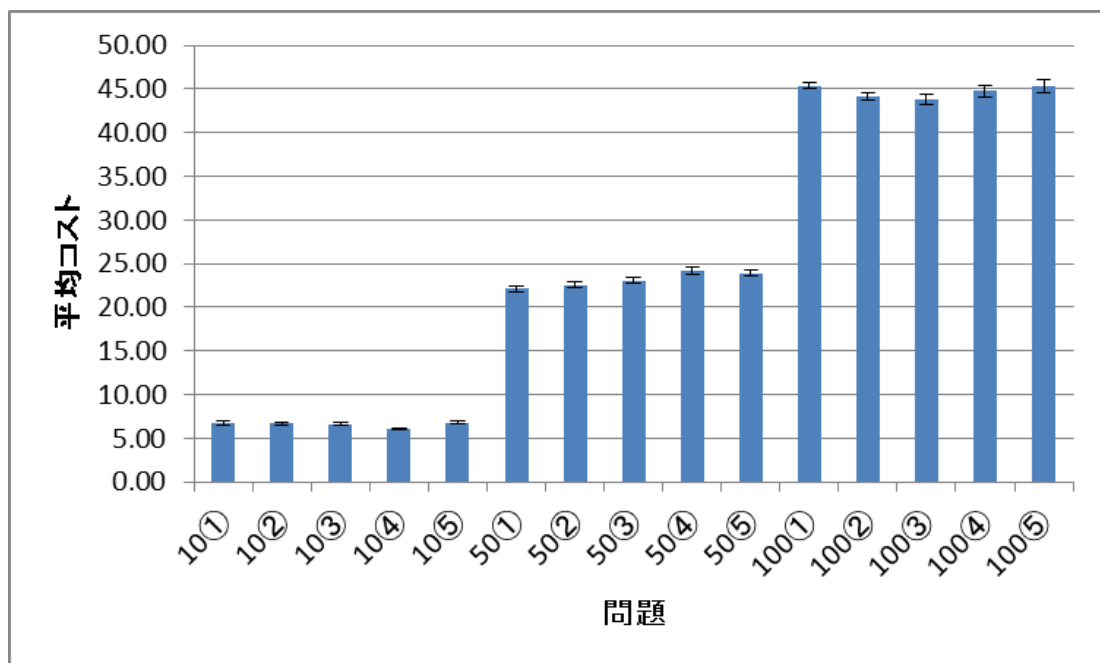


図 15 問題ごとの平均コスト・標準偏差のグラフ (ST)

問題のそれぞれの試行ごとに得られた重要温度を表 3 に示す.

表 3 問題のそれぞれの試行ごとに得られた重要温度

部品数	問題	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目	9回目	10回目
10	①	0.09	0.14	0.10	0.05	0.13	0.05	0.09	0.09	0.12	0.14
	②	0.04	0.10	0.12	0.10	0.12	0.07	0.12	0.11	0.09	0.10
	③	0.07	0.09	0.07	0.09	0.07	0.10	0.09	0.11	0.05	0.12
	④	0.07	0.09	0.08	0.10	0.08	0.07	0.06	0.09	0.07	0.10
	⑤	0.09	0.08	0.09	0.11	0.09	0.09	0.08	0.08	0.07	0.06
50	①	0.06	0.07	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.06
	②	0.06	0.05	0.07	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	③	0.07	0.06	0.03	0.05	0.07	0.06	0.06	0.04	0.04	0.06
	④	0.07	0.06	0.05	0.06	0.06	0.07	0.06	0.07	0.06	0.06
	⑤	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.04	0.07	0.06	0.06	0.06
100	①	0.03	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05
	②	0.05	0.06	0.04	0.05	0.05	0.06	0.05	0.06	0.04	0.04
	③	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.04	0.05	0.05	0.03	0.05
	④	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05
	⑤	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.06	0.05

表 3 より, 部品数 50 と部品数 100 では, 重要温度のばらつきがあまり見られなかったことに  
対して, 部品数 10 では重要温度のばらつきが大きく見られる結果となった.

部品数 10, 50, 100 のそれぞれの問題に対して, SA を用いて解探索を行った場合と ST を用いて解探索を行った場合のそれぞれの最小コストと平均コストのまとめを表 4 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.

表 4 SA・ST 比較実験結果

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 4 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.

## 第 7 章

### 結論



## 第7章 結論

### 7.1. 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 4 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．

図 16 や図 17 のように同じ問題においても，温度ごとの評価値の分布が大きく違うものがあった．ST は極低温によって求められた局所最適解  $x_0$  のコスト  $f(x_0)$  を評価基準としている．従って，ST が評価基準に大きく依存したアルゴリズムであるため，評価値の分布に大きな違いが見られたと考えられる．

また，表 3 の部品数 10 のような重要温度のばらつきが大きく見られる結果となった場合でも，表 2 や図 15 のように標準偏差も小さく，安定したコストが求められた．従って，非常に細かい重要温度を決定する必要はないのではないかと考えられる．

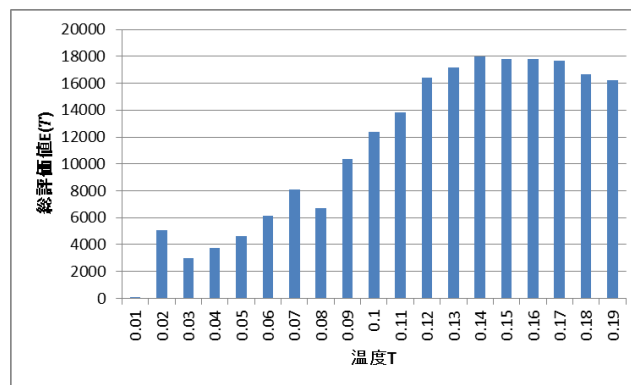


図 16 部品数 10 個の問題①2 回目で得られた評価値分布

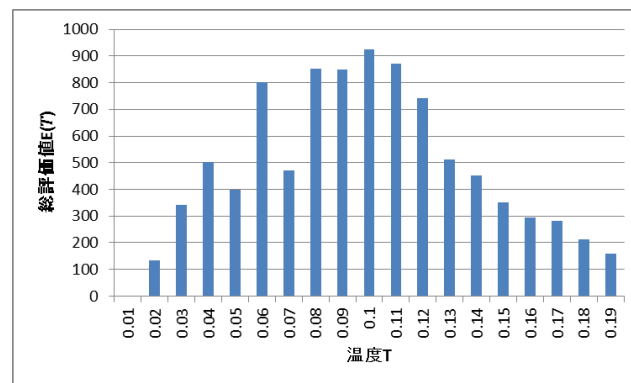


図 17 部品数 10 個の問題①3 回目で得られた評価値分布

## 7.2. 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 18 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推定す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、図 19 のように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。また、実際の表面実装機では、部品の吸装着順・ノズル番号だけでなく、図 20 のようにカセットの位置を入れ替えることもできる。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。

ST は極低温によって求められた局所最適解 $x_0$ のコスト $f(x_0)$ を評価基準としている。初期解 $x$ によっては、極低温によって求められた局所最適解 $x_0$ のコスト $f(x_0)$ にばらつきがあり、評価基準の値が高い場合や低い場合がある。このような理由から、同じ問題であっても温度ごとの評価値分布が図 16 や図 17 のように大きく違う結果になったと推測される。従って、評価基準に依存しないような工夫が必要であると考えられる。

また、本研究では、近傍解 $x'$ の生成に図 4 や図 5 のように部品の吸装着順・ノズル番号を同時に入れ替える方法を採用した。このような方法で近傍解 $x'$ を生成すると、解が限定的になってしまう。従って、部品の吸着順、装着順、ノズル番号を別々に考えて、入れ替えを行えば探索空間が広がり、より最適な解が見つかると考えられる。

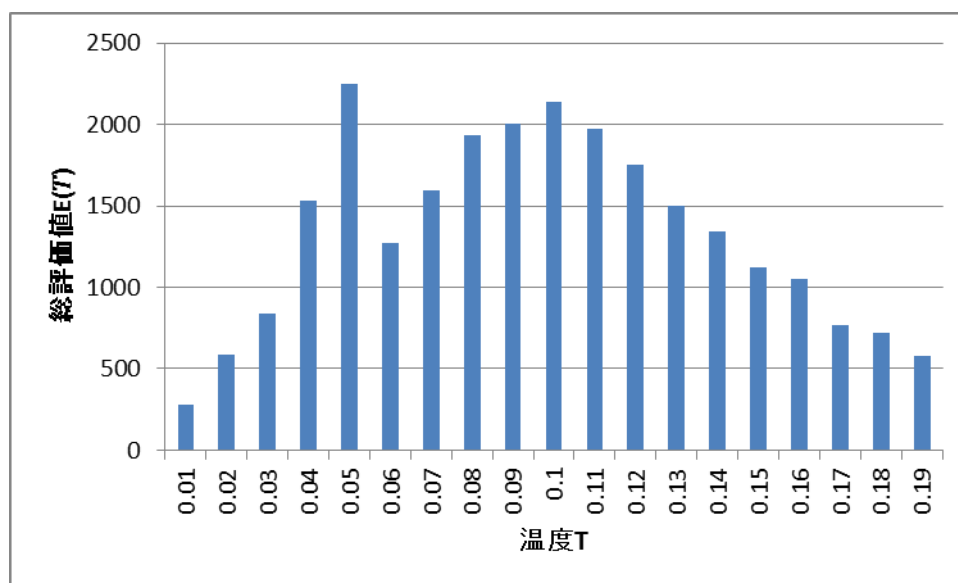


図 18 単峰性にならなかった評価値分布の例

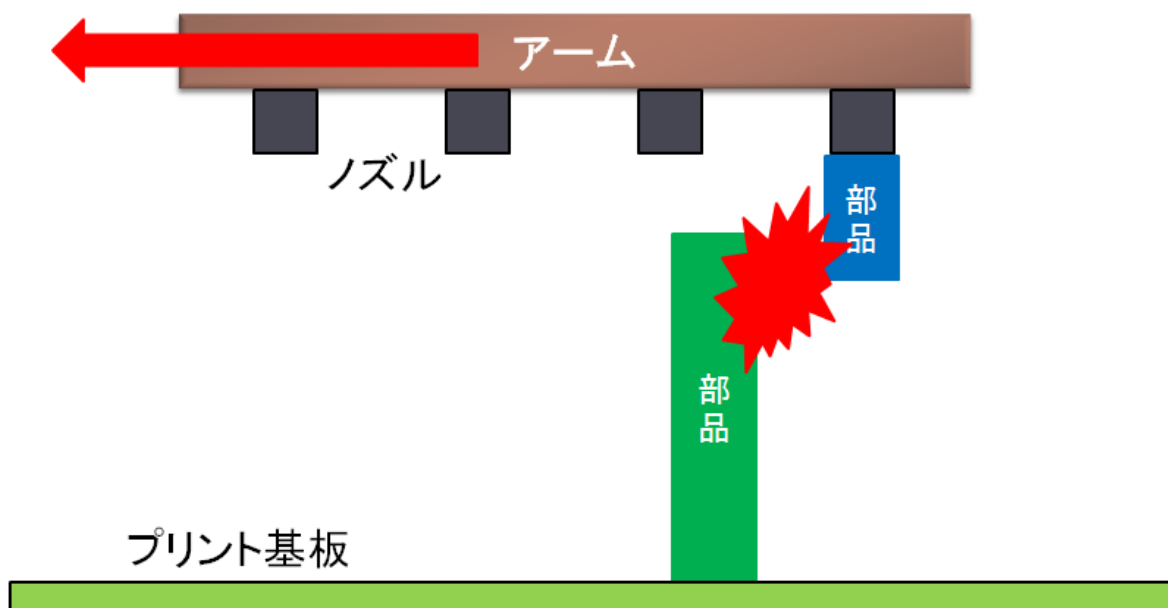


図 19 大きい部品から実装した時に起きる問題

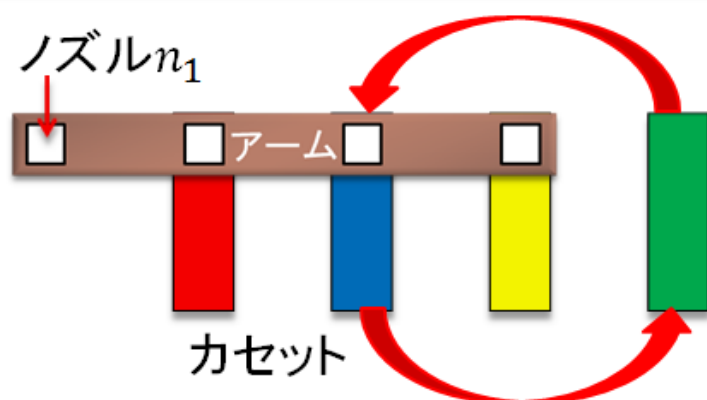
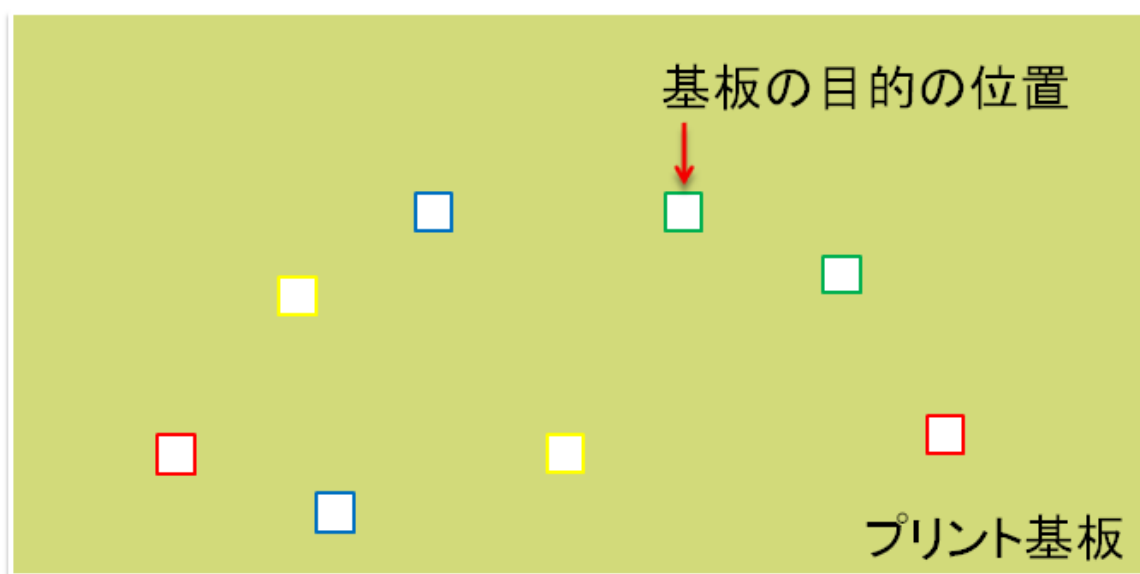


図 20 カセットの位置の入れ替え

## 謝辭

# 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も感謝します．

## 参考文献

## 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.

## 付録



## 付録目次

問題.....	36
フォルダについて .....	44

# 問題

本研究で用いた表面実装機の問題，部品数 10 個 5 問，部品数 50 個 5 問，部品数 100 個 5 問の総計 15 問を付録として図 21～図 35 に示す．

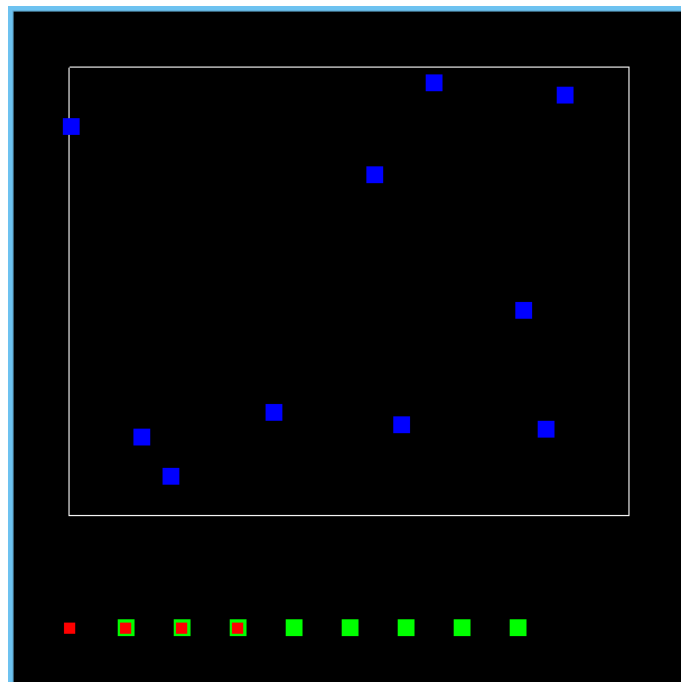


図 21 部品数 10 個の問題①

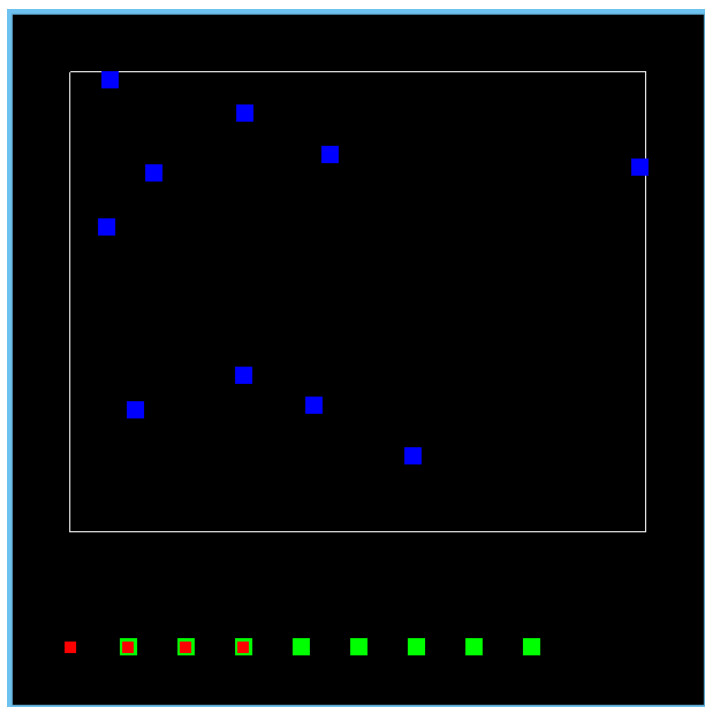


図 22 部品数 10 個の問題②

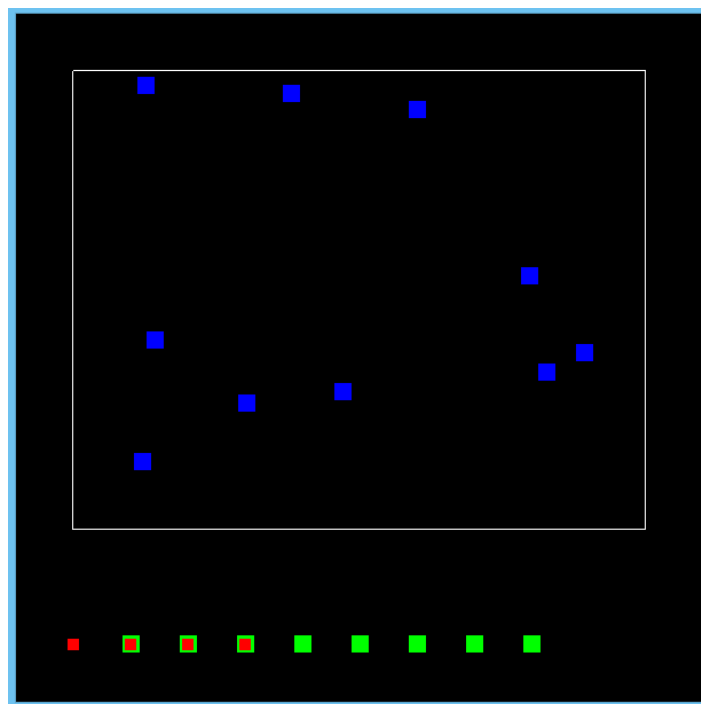


図 23 部品数 10 個の問題③

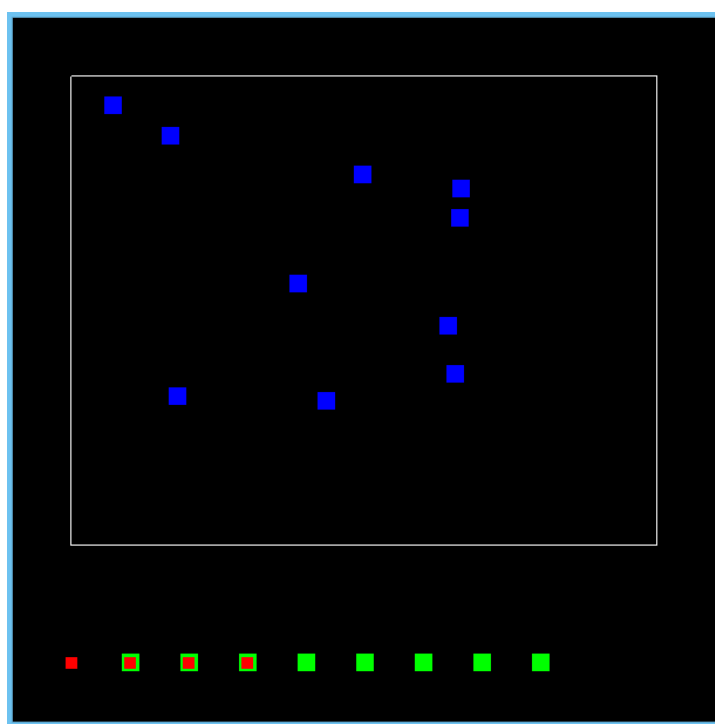


図 24 部品数 10 個の問題④

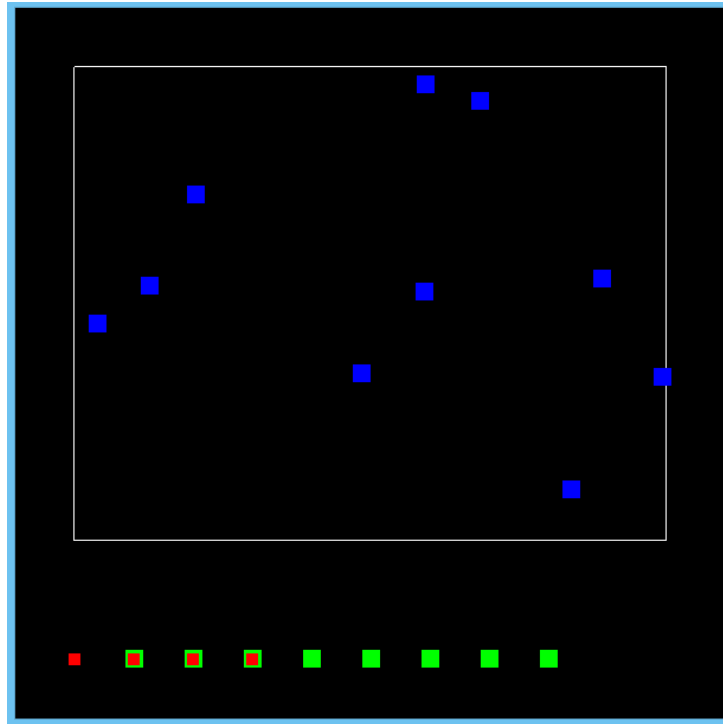


図 25 部品数 10 個の問題⑤

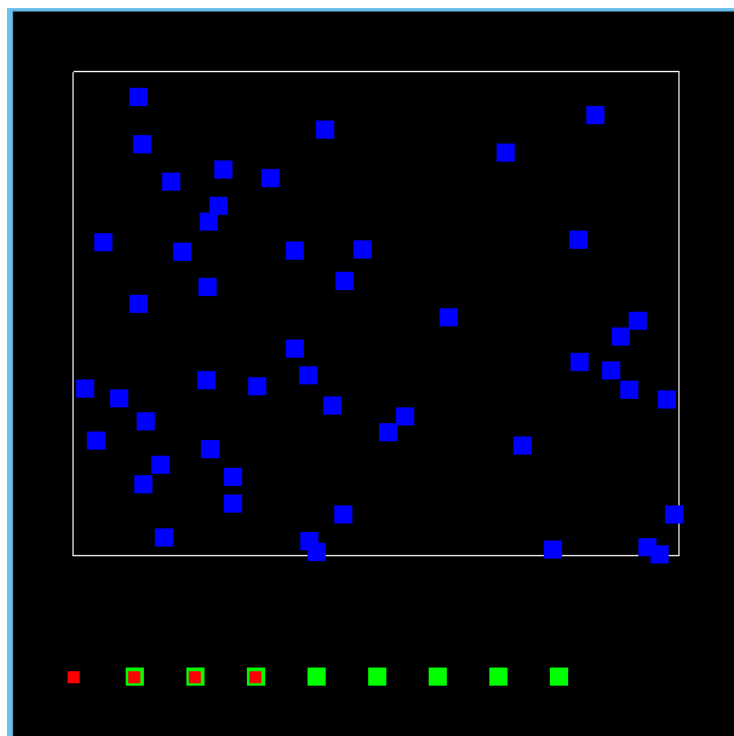


図 26 部品数 50 個の問題①

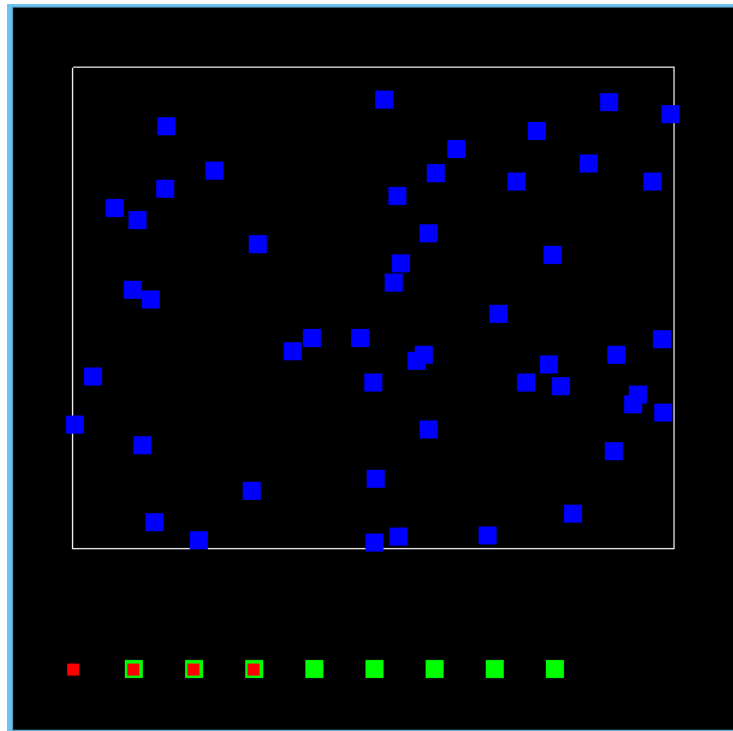


図 27 部品数 50 個の問題②

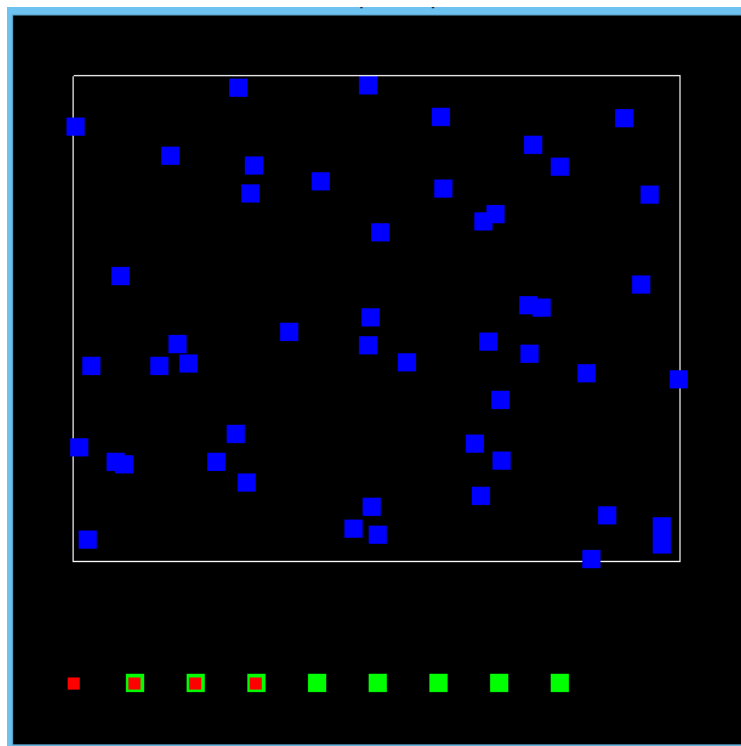


図 28 部品数 50 個の問題③

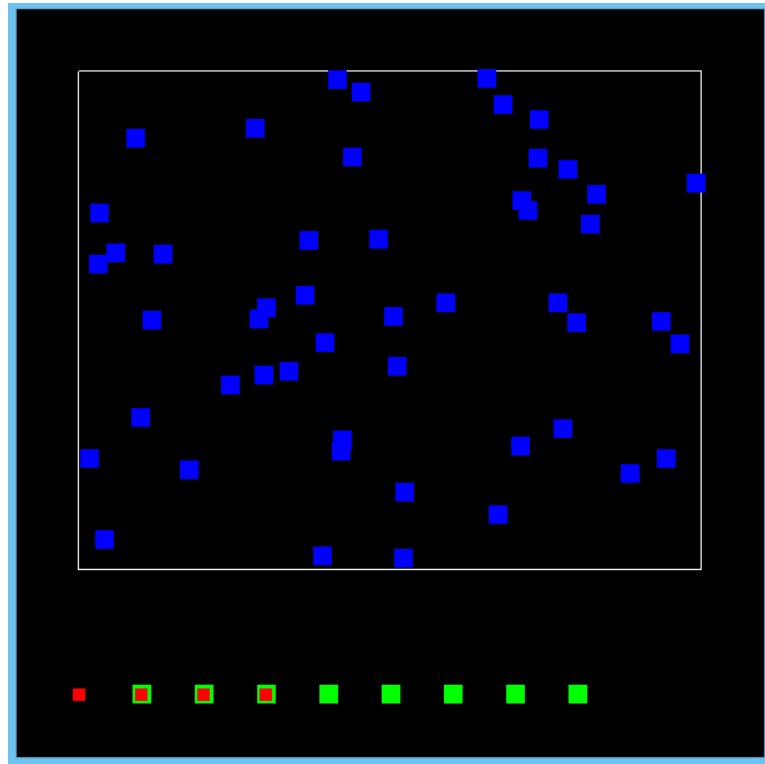


図 29 部品数 50 個の問題④

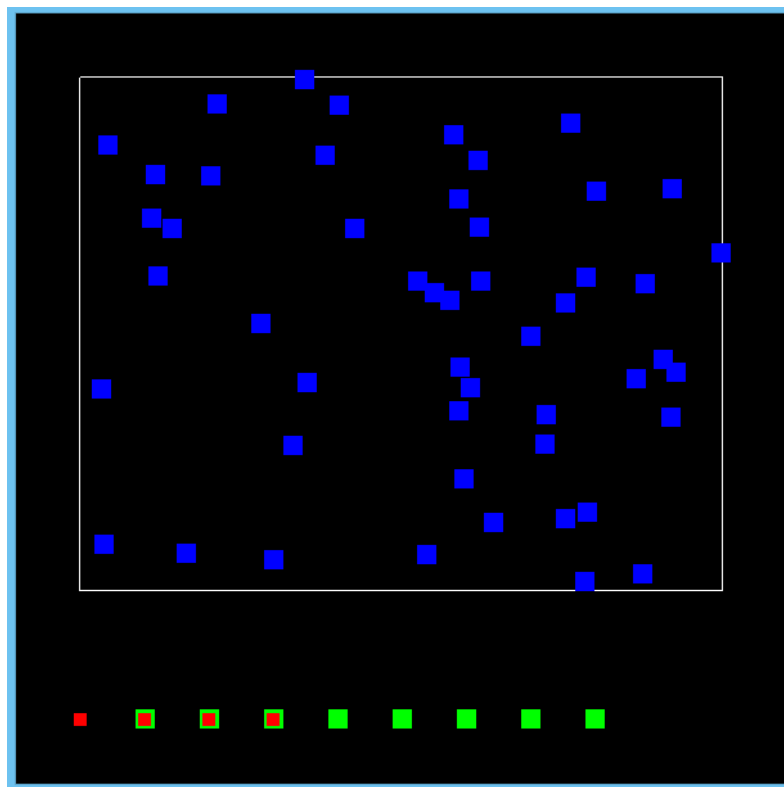


図 30 部品数 50 個の問題⑤

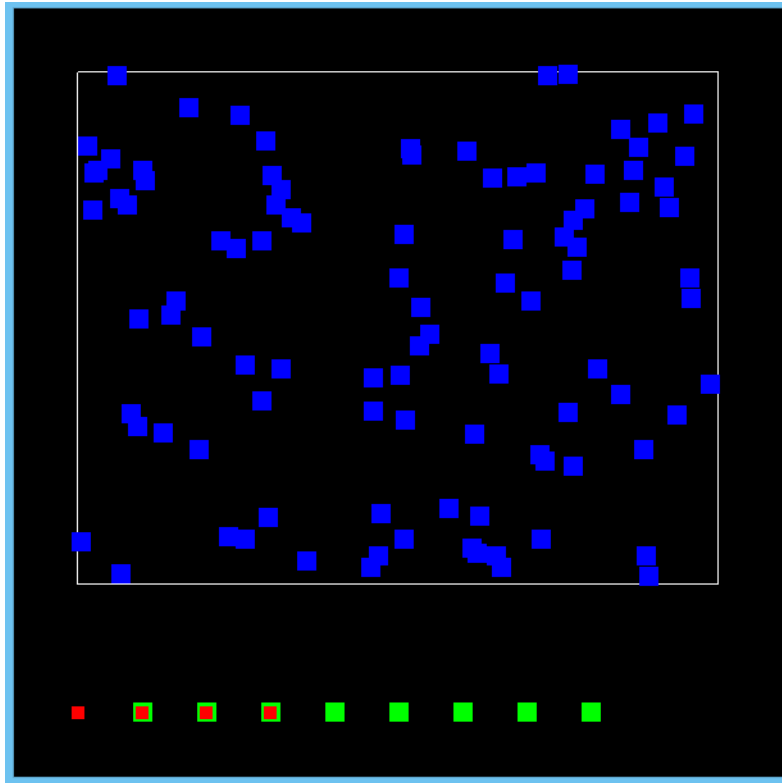


図 31 部品数 100 個の問題①

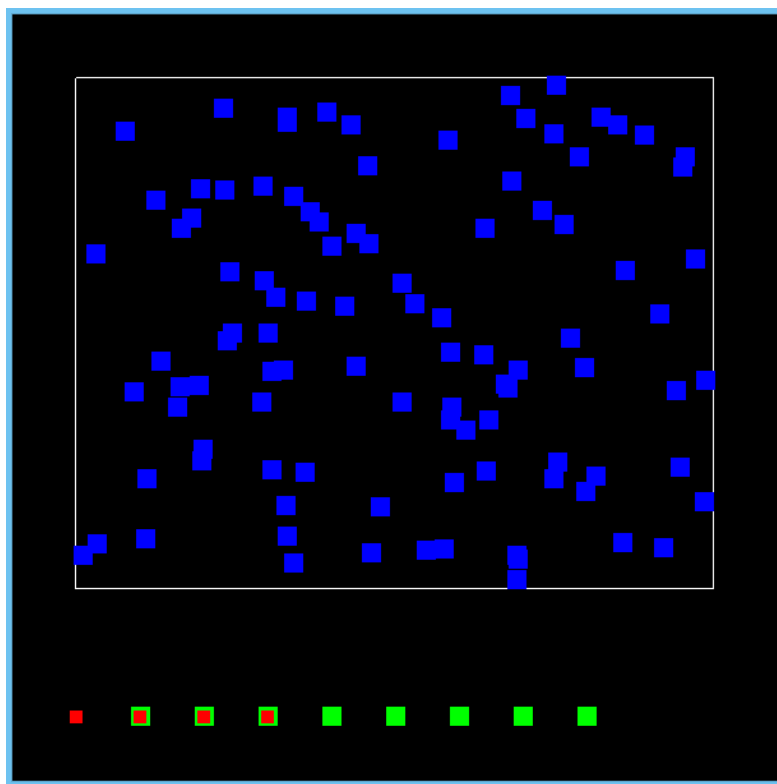


図 32 部品数 100 個の問題②

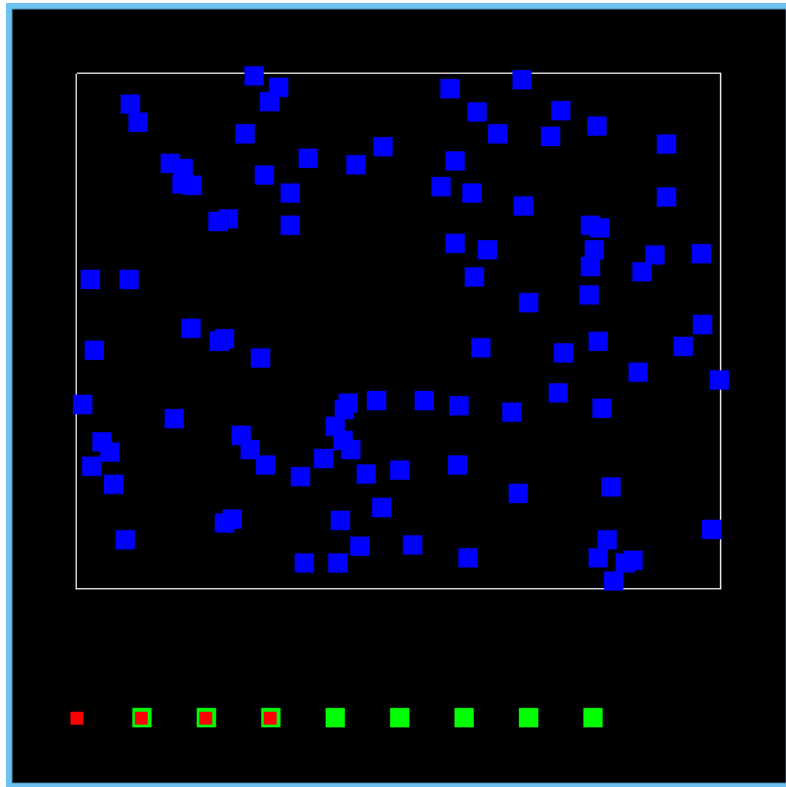


図 33 部品数 100 個の問題③

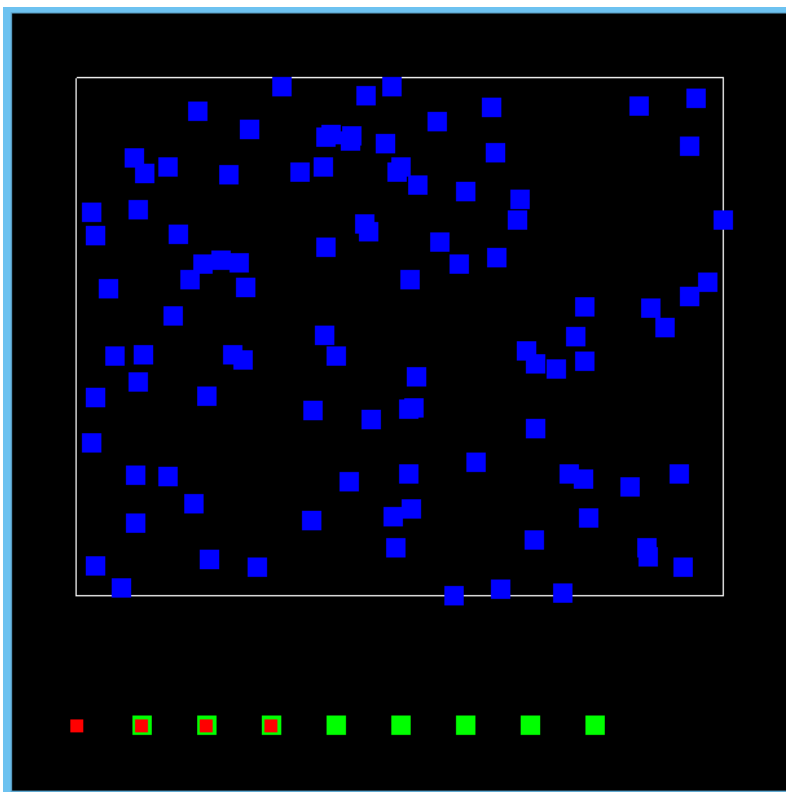


図 34 部品数 100 個の問題④



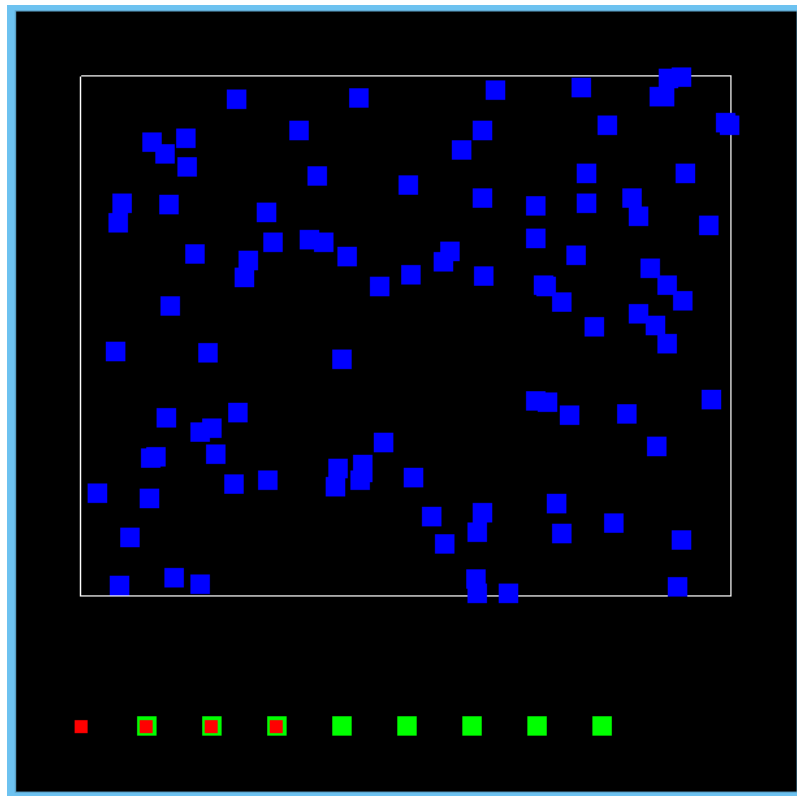


図 35 部品数 100 個の問題⑤

# フォルダについて

フォルダの目録は以下の通りである.

## 1)2014 年度修士研究\_本部宛提出用

- 修士研究紀要と本論の PDF 型

## 2) 2014 年度修士研究本発表

- 修士研究本発表時の紀要と本論とパワポ

## 3) 学会発表資料

- 学会発表時の紀要とパワポなど

## 4) Abstract(日本語 ver.&英語 ver.)

- 紀要に掲載しているアブストラクト

## 5) Program

- 本研究で使⽤した SA のプログラム
- 本研究で使⽤した ST のプログラム

## 6) Simulated Annealing

- SA の実験結果

## 7) Simulated Tempering

- ST の実験結果

## 8) 参考資料

- 研究を進めるにあたって, 勉強に⽤いたファイル等