

# 基板生産ラインの部品装着順序を考慮した ラインバランシング問題に対する ヒューリスティックな解法

戸崎博重<sup>†</sup> 太田秀典<sup>†</sup> 中森眞理雄<sup>†</sup>

電子基板生産において部品を基板に装着する工程では、部品装着機を複数台直列に連結することによってラインを形成し、部品を基板に装着する。多くの生産の現場では、各装着機への部品の割当ては、部品数を基にした見積もり時間のみを考慮するのが普通であった。しかし、各装着機の装着時間は装着経路に大きく影響を受け、上記の見積もり方法では実際の生産時間との乖離が大きくなってしまふ。本論文では、各装着機の装着経路を求めた上で部品の割当てを行うヒューリスティックなアルゴリズムを提案する。提案アルゴリズムが従来の手法と比べてよりよい結果を与えることを計算機実験により示す。

## A Heuristic Algorithm of the Line Balancing Problem Considering Component Placement Sequence in a Printed Circuit Board Assembly Line

HIROSHIGE TOZAKI<sup>†</sup> HIDENORI OHTA<sup>†</sup>  
MARIO NAKAMORI<sup>†</sup>

In a process of manufacturing printed circuit boards, several chip mounting machines form an assembly line for mounting chips on boards. In the conventional method, components are assigned to machines on the assumption that the performance of each machine is proportional to the number of components. However such assumption of performance is not adequate because performance is affected not only by the number of the components but also by the order of mounting. In this paper, we propose a heuristic algorithm to assign

components to machines with consideration of the order of mounting. Computational experiments show that the proposed algorithm is superior to conventional algorithms.

### 1. はじめに

電子基板生産において、通常は集積回路等の電子部品を基板に装着する工程が生産時間においてボトルネックとなり、最も生産効率に影響を与える工程となる。この工程では、部品装着機と呼ばれる機械を複数台直列に連結することで、ラインを形成し、部品の基板への装着を行っている。基板生産時間の短縮を目的として、ラインや各部品装着機ごとの運用、動作最適化アルゴリズムの研究が盛んに行われている[1]。

本論文では、多機能型部品装着機（以下では装着機と略す）を用いた部品装着ラインの部品の割当て問題を扱う。部品装着ラインにおける部品の割当て問題は、生産効率が高くなるように与えられた複数の部品を各部品装着機に割当てる問題である。この問題は各装着機の部品装着順序問題と互いに影響しあっており、それぞれ独立に最適化した結果を組み合わせても必ずしも全体の最適化につながるわけではない。しかしながら、これまでの各装着機への部品の割当ては部品装着順序問題とは独立に解かれてきていた。しかも、部品の割当てに際しては部品数を基にした見積もり装着時間のみが使われ[2]、各装着機の装着経路のことを考慮する手法は考案されてこなかった。部品数を基にした見積もりの方法では、実際の生産時間との乖離が大きくなり、正の相関すら疑わしい。そこで、本論文では、各装着機における装着経路を求めながら部品の割当てを行うヒューリスティックなアルゴリズムを提案する。

### 2. 問題とモデル化

装着機にはヘッドと呼ばれる部位があり、ヘッドには部品を吸着・装着することができるノズルが複数本ついている。装着機の動作は、最初にヘッドが部品供給部上にある複数の部品を吸着し、それらの部品を吸着したまま基板上の1つの部品の装着地点まで移動してその部品を装着し、別の部品の装着地点までヘッドを移動してはその部品を装着するという動作を繰り返し行い、吸着した全ての部品を装着し終えたら、再び部品を吸着するためにヘッドは部品供給部上へと戻る。ヘッドが部品供給部で部品を装着してから、ヘッドが部品供給部へ戻るまでの一連の動作はターンと呼ばれる。

本論文では、各装着機における装着経路を考慮した部品割当て問題を扱う。ラインの

<sup>†</sup> 東京農工大学  
Tokyo University of Agriculture and Technology

評価はボトルネックとなる装着機が1つの基板あたりに費やす時間によって決まり、これはヘッドの移動距離に大きく影響を受ける。そこで、部品割当と部品装着順序から各装着機のヘッドの移動距離を算出し、最長のヘッド移動距離をその部品割当の評価値とする。

本論文では特に部品割当と装着順序に焦点を当てるため、部品吸着については問題を簡略化し、部品吸着は部品供給部上の1点において行われるとして扱う。また、ノズル間の距離も考慮しないことにし、部品吸着に際してヘッドは移動しないものとする。装着機のどのヘッドのどのノズルでも全ての部品を装着することが可能であり、部品供給部に配置できる部品種類数の上限も無いものと仮定した。

以上の問題を整数計画問題として次のように定式化した。

$$\min z = \max(T_j) \quad j = 1, \dots, jsiz e \quad (1)$$

subject to

$$T_j = \sum_{r=1}^{m_j} \left\{ t[c(0), c(m_{jr})] + \sum_{i=1}^{m_{jr}} t[c(i-1), c(i)] \right\} \quad (2)$$

$$m_{jr} \leq N \quad (3)$$

$$t(a, b) = \max(|x_b - x_a|, |y_b - y_a|) \quad (4)$$

$$M = \sum_{j=1}^{jsiz e} \sum_{r=1}^{m_j} m_{jr} \quad (5)$$

$z$ : 目的関数値

$T_j$ : 装着機  $j$  の総移動距離

$jsiz e$ : ラインを構成する総装着機数

$m_j$ : 機械  $j$  の部品装着経路数

$c(i)$ : 経路の  $i$  番目の部品座標

$c(0)$ : 部品供給部の座標

$m_{jr}$ : 装着機  $j$  の経路  $r$  に含まれる総部品数

$N$ : ノズル数

$x_a$ : 部品  $a$  の  $x$  座標

$y_a$ : 部品  $a$  の  $y$  座標

$M$ : 全装着部品数

(1) は目的関数であり、(2) で表される各装着機のヘッドの総移動距離の最大値を最小にすべきことを述べている。(3) は一回で装着することのできる最大部品数の制約。(4) は部品装着点2点間のチェビシェフ距離。(5) は一枚の基板に装着される

部品数を表す。

### 3. 従来手法

従来手法では、部品数による見積もり値上でバランスが取れるように部品を装着機へ割当てた後、各装着機においての部品の装着順序を決定し、ヘッドの経路を作成する。なお、この手法は焼きなまし法に容易に拡張できる。従来手法で得られた割当を初期解とし、解を準最適解へと改善する方法として、ボトルネックとなった装着機に割当てられた部品を他の装着機に割当てられた部品と交換したり、ボトルネックとなった装着機に割当てられた部品を他の装着機へ挿入したりする手法を拡張従来手法と呼ぶことにする。拡張従来手法のフローチャートを図1に示す。

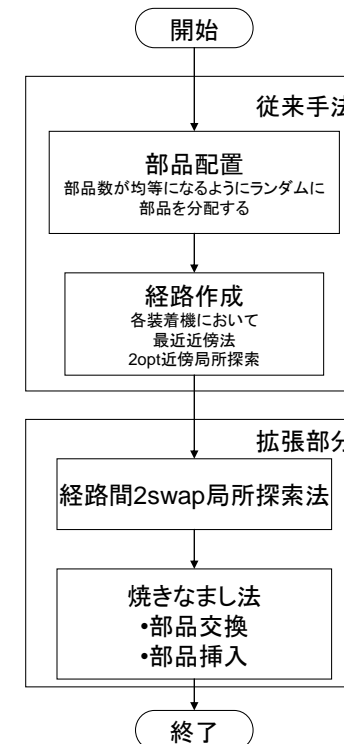


図1 拡張従来手法のフローチャート

#### 4. 提案アルゴリズム

本論文では遺伝的アルゴリズムに局所探索法を組合せたハイブリッドな遺伝的アルゴリズムを提案する。提案アルゴリズムのフローチャートを図 2 に示す。

遺伝的アルゴリズムに局所探索法を組み合わせることで、遺伝的アルゴリズムの苦手とする局所的な探索が強化され、より精度の高い解を得られるようになる。本論文で提案するアルゴリズム中では、局所探索法を初期解の生成、突然変異、子孫の解の改善に用いる。

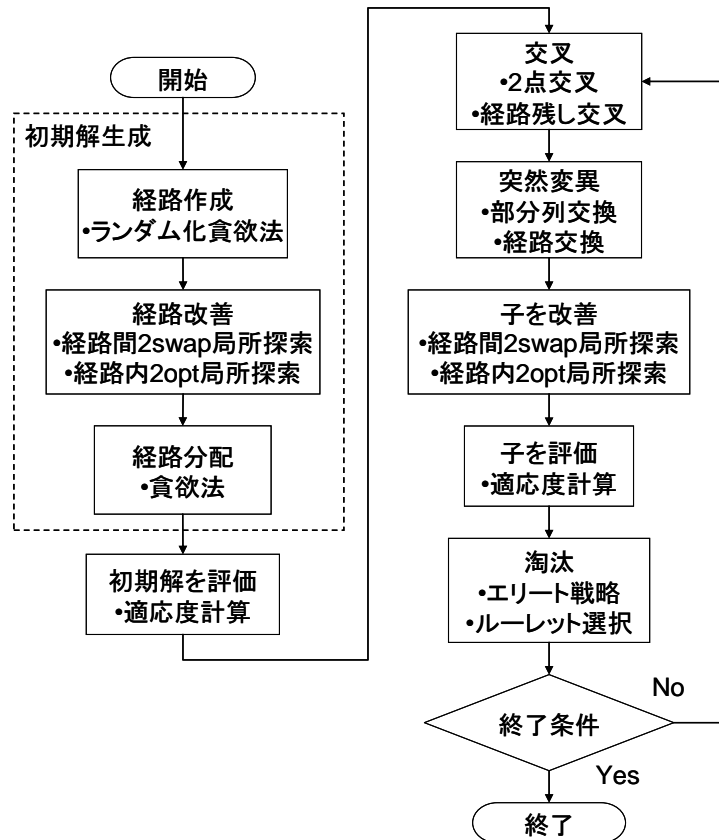


図 2 提案アルゴリズムのフローチャート

#### 4.1 解の表現

提案アルゴリズムでは、どの装着機も等しいターン数で部品を装着することにする。ターン数が増えるとヘッドの部品供給部と基板上への移動が頻繁に起こることになるので、各装着機のターン数はなるべく少なくなることが望ましい。1つの装着機が必要とする最少のターン数は式(6)によって求められる。装着機数と部品数によっては、いくつかのノズルに部品を吸着させないターンが存在することに注意されたい。

$$m_j = \left\lceil \frac{M}{N \times jsize} \right\rceil \quad (6)$$

部品に個別の番号を割り振り、割り振られた部品番号を図 3 のように並べることで解の表現を行う。並べられた部品を先頭から一定数で区切ると、部品の装着機への割当や経路割当に対応する。また、ターン内の部品番号の並び順は部品の装着順序を表すことにする。図 3 では装着機台数 2 台、ノズル数 6 本、各装着機がそれぞれ 2 ターンで部品装着を行う場合の例である。部品を吸着しないノズルには部品番号の代わりに記号  $e$  を挿入している。図 4 に図 3 で示した解に対応する部品割当とヘッドの各経路を示す。

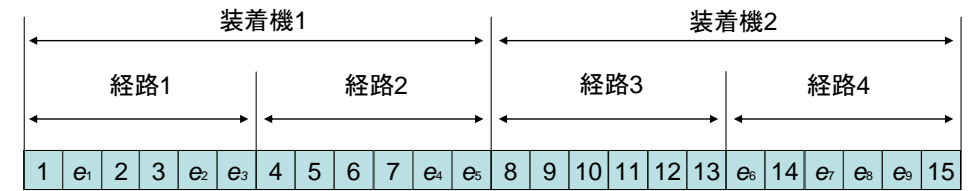


図 3 解の構造

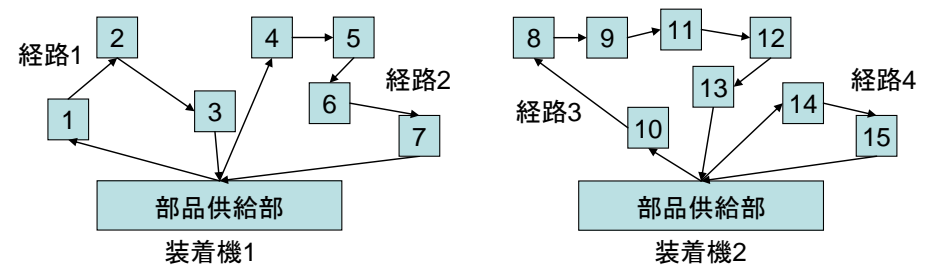


図 4 図 3 の解における装着機への部品割当とヘッドの経路

#### 4.1.1 解の適応度

評価値はボトルネックとなった装着機のヘッドの移動距離なので、評価値に基づいて交叉における親の選択や個体の淘汰を行うと、ボトルネックとなった装着機以外の装着機については考慮されないことになる。しかしながら、ボトルネックとなった装着機以外の経路長も、交叉や突然変異で生成する解に大きく影響を及ぼす。そこで、本論文ではボトルネックとなる装着機の配線長とは別に、全ての装着機のヘッドの総配線長を考慮した解の適応度を算出することにする。各個体の適応度はボトルネックとなった装着機のヘッドの移動距離と、全ての装着機のヘッドの移動距離を足し合せ、2乗でスケーリングした値の逆数とする。式(7)に総経路長 $L$ の算出式、式(8)に適応度 $f$ の算出式を示す。

$$L = \sum_{j=1}^{jsize} T_j \quad (7)$$

$$f = \left( \frac{1}{z + L} \right)^2 \quad (8)$$

#### 4.2 初期解生成

遺伝的アルゴリズムには定められた個体数分の初期解が必要となる。それぞれの初期解は以下の2つのステップを経て生成される。

- (1) 経路をランダムに作成する。
- (2) 2opt と 2swap 近傍の局所探索法を用いて経路の改善を行う。

#### 4.3 交叉

提案アルゴリズムでは、以下の(1)から(3)の手順によって交叉を行い、子の解を得る。

- (1) 親1からランダムな長さの部分列を選択する。
- (2) 選択された部分列に含まれる全ての要素を親2から削除した列を作成する。
- (3) (2)で作成した列に(1)で選択した部分列を挿入する。なお、挿入個所は親1において部分列が存在した位置とする。

交叉による子の生成の例を図5に示す。なお、2つの親個体は適応度に比例した確率でランダムに選択されて交叉を行う。また、選択された親の組で親1と親2を交換し同様の操作を行う。従って、1組の親から2つの子が生成されることになる。

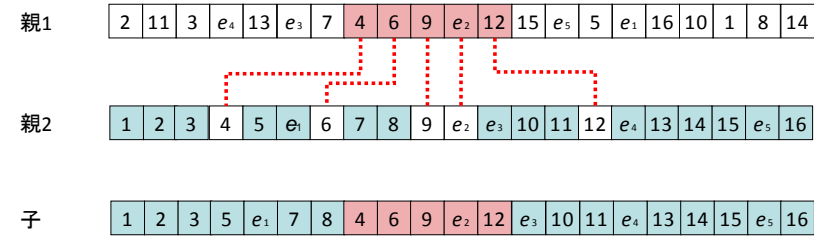


図5 交叉の様子

#### 4.4 突然変異

本論文では部分列交換、経路交換による2種類の突然変異を提案する。なお、突然変異を生成する親個体は親世代の個体からランダムに選択される。

##### 4.4.1 部分列交換突然変異

部分列交換突然変異では、選ばれた個体からランダムに部分列を2つ選び、これらを交換する。部分列の長さは指定した範囲内でランダムに変化させることにする。図6に部分列の長さが2のときの交換の例を示す。

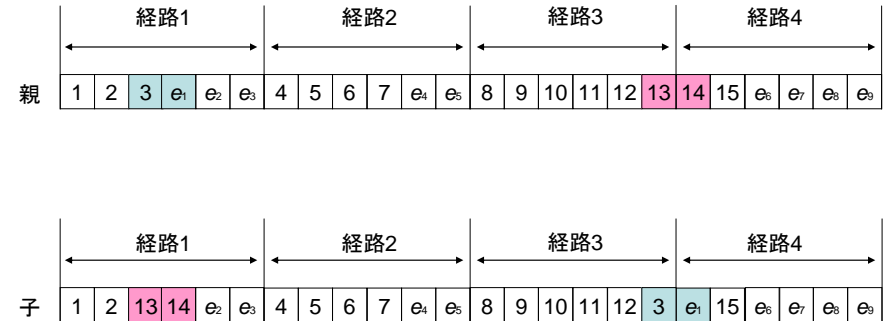


図6 部分列交換突然変異の様子

##### 4.4.2 経路交換突然変異

経路交換突然変異では、選ばれた個体からランダムに経路に相当する部分列2つを選び、これらを交換する。図7に経路交換突然変異の例を示す。

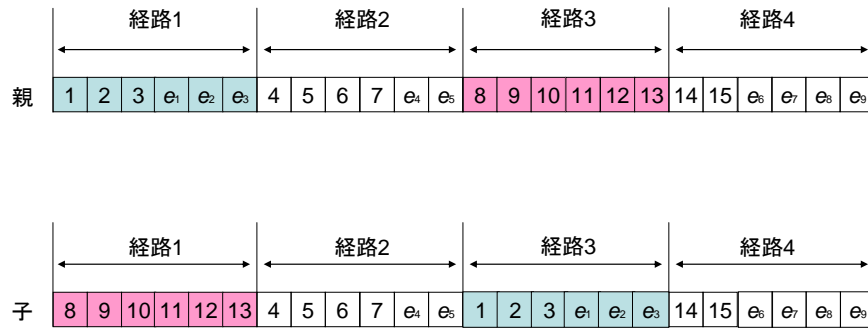


図 7 経路交換突然変異の様子

#### 4.5 淘汰

次世代の 30%はエリート戦略によって次世代へと個体を残し、残りの 70%はエリート戦略で選ばれなかった個体の中からルーレット選択によって次世代へ残す個体を決する。ルーレット選択では、適応度に比例した確率で個体が選択されることにする。

### 5. 計算機実験

提案した手法の性能を評価するために、計算機により比較実験を行った。実験環境は CPU が Intel Core2 Duo 3GHz, メモリが 1.96GB, 言語は C++を用いた。

ライン上の装着機台数を 6, ヘッドのノズル本数は 12 とし、装着開始点は基板の重心から y 方向に 350mm 離れた位置に設定した。入力として、サイズが横 100mm, 縦 100mm である基板上にランダムに装着点の座標を設定した 9 種類のデータを用意した。

提案アルゴリズムの個体数を 25, 終了条件を世代数が 3000 と設定し、その他のパラメータは予備実験により適切な値を設定した。図 8 に提案手法と拡張従来手法の評価値と計算時間の関係を示す。提案手法は拡張従来手法よりもよい評価の解を短時間で得られていることが確認できる。

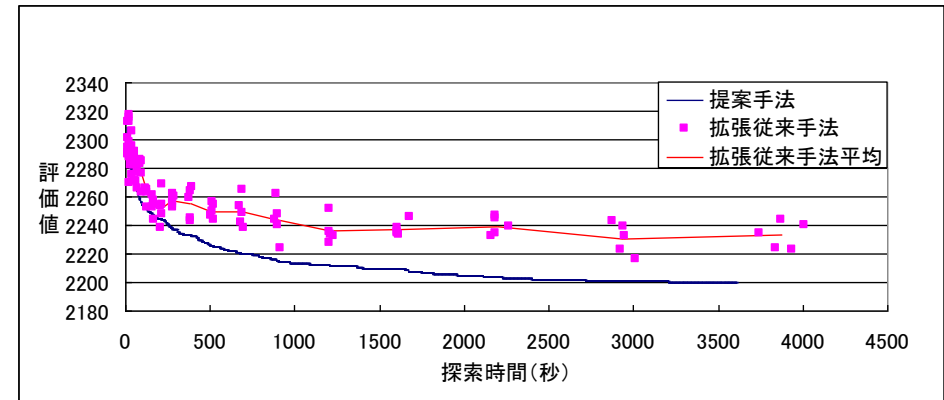


図 8 基板 4 における評価値と探索時間の関係

表 1 に各入力データにおける提案手法, 従来手法, 十分に時間を掛けて得られた拡張従来手法のそれぞれ評価値を示す。提案手法は 9 種類の問題全てにおいて最も良い評価値を得ている。拡張従来手法は従来手法から平均 13.9%改善, 提案手法は従来手法から平均 14.6%の改善となった。

表 1 各手法の探索時間と評価値

装着点数	従来手法		拡張従来手法		提案手法		
	探索時間	評価値	探索時間	評価値	探索時間	評価値	
1	100	0.005	1694.93	837.08	1420.66	495.92	1414.69
2	100	-	1674.24	840.00	1405.06	525.12	1404.95
3	100	-	1675.75	829.32	1441.25	520.31	1423.67
4	200	0.005	2594.38	3896.77	2232.47	3607.88	2199.93
5	200	0.016	2594.04	3922.46	2225.78	3648.23	2194.31
6	200	-	2585.95	3880.22	2210.18	3869.80	2181.23
7	400	0.130	5048.42	42167.83	4381.65	34179.47	4357.23
8	400	0.125	5041.57	39346.17	4381.29	31826.50	4360.36
9	400	0.130	5052.73	38433.20	4373.88	31012.80	4342.90

探索時間の単位は (秒)

## 6. まとめ

本論文では、基板生産ラインにおいて部品数による見積もりではなく、実際に装着経路を作成して部品割当を行う手法を提案した。そして、提案手法は従来の手法やそれを拡張した手法よりも短時間で良い解を得られることを、計算機実験によって確認した。

今後の課題としては、さらに部品種類数や部品高さなど電子基板生産の特徴的な制約を反映させること等が挙げられる。

## 参考文献

- 1) Mari Ayob, Graham Kendall. A survey of surface mount device placement machine optimization: Machine classification. *European Journal of Operational Research* 186 (2008) 893–914
- 2) Osman Kulak, Ihsan Onur Yilmaz. Hans-Otto Günther, A GA-based solution approach for balancing printed circuit board assembly lines. *OR Spectrum* (2008) 30:469–491