

電子基板生産の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 -ノズル・部品の割当てに制約がある場合-

岡本大輔^{†1} 太田秀典^{†1} 中森眞理雄^{†1}

電子基板の生産では、部品装着機と呼ばれる機械を複数台、直列に連結して生産ラインを形成し、電子部品の基板への装着を自動で行う。ライン全体の生産能率が向上するよう各部品装着機へ部品を割当てる手法として、装着経路を考慮して部品割当てを行う手法が、既に提案されている。しかし、この手法はノズルと部品の制約を全く考慮しておらず、部品の大きさに応じてノズルを使い分けるような生産ラインに対しては適用が困難である。本論文ではこの手法を拡張し、ノズルと部品の組合せに制約がある場合の各部品装着機への部品の割当てを求めるヒューリスティックな解法を提案する。

A Heuristic Algorithm for the Line Balancing Problem in Printed Circuit Board Assembly - The Case with Constraints on Component-nozzle Assignment -

DAISUKE OKAMOTO^{†1} HIDENORI OHTA^{†1}
MARIO NAKAMORI^{†1}

Electronic circuit boards are produced automatically through a production line that consists of chip mounting machines arranged in series. Algorithms of assigning chips (components) to these machines have been proposed that makes the throughput of the line to be the maximum. These algorithms, however, do not take constraints between nozzles and chips into account and so are impossible to apply to the practical case where an adequate nozzle has to be chosen for each chip. In the present paper we extend the algorithm to the case that has constraints between nozzles and chips and propose a heuristic algorithm of assigning chips to machines.

1. はじめに

電子基板の生産はいくつかの工程（塗布、装着、熱処理、など）を経て行われるが、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及ぼす。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により生産ラインを形成し、部品を基板に自動装着する。基板の生産時間短縮を目的として、ラインや各部品装着機ごとの運用や動作を最適化する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、与えられた複数の部品をライン全体の生産効率が高くなるように各部品装着機に割当てることを考える。従来、この割当ては、部品数を基にした作業時間の見積りに従って行うことが多かった[2]。しかしながら、各部品装着機の動作時間は装着する部品の数だけではなく、部品を装着するヘッドの移動距離からも大きく影響を受ける。そのため、部品の装着順序と独立に各装着機への部品の割当てを求めても、見積りの生産時間と実際の生産時間との乖離が大きくなり、生産効率の高い割当てにならない場合がある。

そこで、戸崎らは装着経路を考慮して部品割当てを行う手法を提案し、従来の見積りによる手法よりも短時間で良い部品の割当てを行えることを計算機実験によって確認した[3]。また、この方法を更に拡張し、装着経路のみではなく吸着動作についても考慮に入れることで、独立実装方式の生産ラインにも対応させる方法も提案されている[4]。

しかしながら、これらの手法は、部品とノズルの組合せの制約を全く考慮しておらず、どの部品も任意のノズルで吸着することが可能であると仮定している。実際の部品装着機は、部品の大きさによっていくつかノズルを使い分ける必要があるため、特にさまざまな大きさの電子部品を装着しなければならない基板の生産ラインに対して前述の手法を用いることは困難である。

そこで、本論文では、戸崎らの手法を改良し、部品とノズルの組合せに制約がある場合の部品の割当てを求めるヒューリスティックな解法を提案する。

2. 問題設定

複数の多機能型部品装着機（以下、部品装着機）で構成される電子基板生産ラインで基板に電子部品（以下、部品）の装着を行うことを考える。基板にはいくつかの種類部品が装着されるが、本論文では部品の大きさの順に部品の種類をそれぞれ C_1, C_2, \dots, C_m と呼ぶことにする。ここで m

^{†1} 東京農工大学
Tokyo university of agriculture and technology

とはその基板に装着される部品の種類数である。

基板一枚あたりの生産時間を最小にするには、どの部品をどの部品装着機で装着させるか（**機械割り当て**）だけではなく、各部品装着機の動作についても考慮する必要がある。

部品装着機の簡略図を図 1 に示す。部品装着機はヘッドと呼ばれる部位を持ち、ヘッドには部品の吸着、装着を行うためのノズルが複数本ついている。なお、本論文では生産ラインを構成する各部品装着機の性能はすべて同じであり、各ヘッドに取り付けられているノズル種類の構成のみが異なると仮定する。

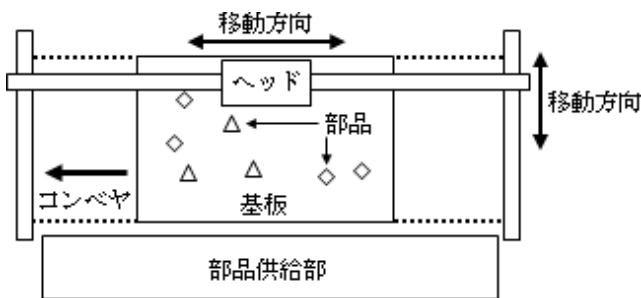


図 1 部品装着機の簡略図

基板への部品の装着は以下の動作の繰り返しにより行われ、この一連の動作をターンと呼ぶ：

1. ヘッドを部品供給部上に移動させ、必要な部品をノズルに吸着させる（吸着動作）；
2. そのターンで装着を行う部品をすべて吸着したら、ヘッドを基板上に移動させ、部品を装着する地点を回り、それぞれの地点で部品の装着を行う（装着動作）；
3. 吸着したすべての部品を装着し終わったら、ヘッドを再び部品供給部に戻す。

1 台の部品装着機に割り当てられたすべての部品の装着が完了するまで、一般には複数回のターンが行われる。

本論文では、特に部品の割当て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ものとして扱う。また、ヘッドの各ノズル間の距離も考慮しないこととし、部品吸着に際してヘッドは移動しないものとする。そして、簡単化のため部品装着機の動作時間はヘッドの移動距離にのみ比例することにする。なお、ヘッドは x 方向と y 方向のそれぞれ独立した 2 つのモータによって移動するため、ヘッドの移動距離はチェビシェフ距離で定義することにする。

同じターン内で装着される部品については、互いの吸着位置や装着位置に近い方がヘッドの移動距離が短くなり、少ない時間で動作を完了させることができる。このため、部品装着機の吸着、装着動作を最適化するには、各部品をそれぞれ何ターン目に装着するか（**ターン割当て**）を十分

に考慮すべきである。また、各ターンで部品を装着する順序（**装着順序**）もヘッドの移動距離を考える上で非常に重要となる。

本論文で扱う部品装着機のヘッドには、いくつかの種類のノズルがついているものとする。各ノズルが吸着できる部品の大きさはそれぞれ決まっているため、どのノズルでどの部品を装着するか（**ノズル割当て**）を適切に決める必要がある。本論文では部品種類 C_i から部品種類 C_j までを吸着可能なノズルを N_{ij} と記述することにする。

本論文の目的は、ライン全体の動作時間が最小となるように、部品の機械割当て、ターン割当て、ノズル割当て、装着順序をそれぞれ求めることである。なお、ライン全体の動作時間はボトルネックとなる部品装着機の動作時間によって決まるものとする。

3. アルゴリズム

本論文では戸崎らの手法を改良し、ノズルと部品の組み合わせに制約がある場合の部品装着機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を提案する。図 2 に提案アルゴリズムのフローチャートを示す。提案アルゴリズムは、戸崎らの手法と同様に、遺伝的アルゴリズムに局所探索法を組み込んだものであるが、ノズルと部品の組合せに制約があるため解の遺伝子表現型が複雑な点、また、それに伴って交叉や突然変異の方法や、経路改善について制約が加わっている点が戸崎らの手法と大きく異なる。

3.1 解の遺伝子表現

戸崎らが扱った問題では、部品の種類とノズル間の組合せの制約が何も存在しないと仮定していた。この条件下では、ライン全体の必要最小のターン数を容易に算出可能である。戸崎らはこの必要最小の合計ターン数を各部品装着機に均等に割り振ることで、各部品装着機のターン数を設定していた。これは、ターン数が増えると部品供給部と基板の間の往復が頻繁に起きることになるので、各部品装着機のターン数はなるべく少なくするためである。

一方、本論文で扱う問題においては、ラインを構成する各部品装着機のヘッドのノズル構成はそれぞれ異なり、部品の種類とノズル間の組合せの制約が存在している。このため、戸崎らの手法と同様の方法で各部品装着機が必要とする最小限のターン数を見積もるのは困難である。無論、予め十分余裕を持たせてターン数を設定しておくことも可能であるが、探索の過程で不要なターン数が数多く発生し、探索の収束に多大な時間を要してしまうことが考えられる。

そこで、提案手法では、遺伝子型として各部品装着機のターン数を固定せず、交叉のときなど必要に応じて柔軟に遺伝子型を変化させられるように解を表現する。

解の遺伝子表現として、図 3 のように部品の順列とノズルの列を用いる。部品とノズルの対応（部品のノズル割当て）は部品の並び順と、ノズルの並び順から表現される。

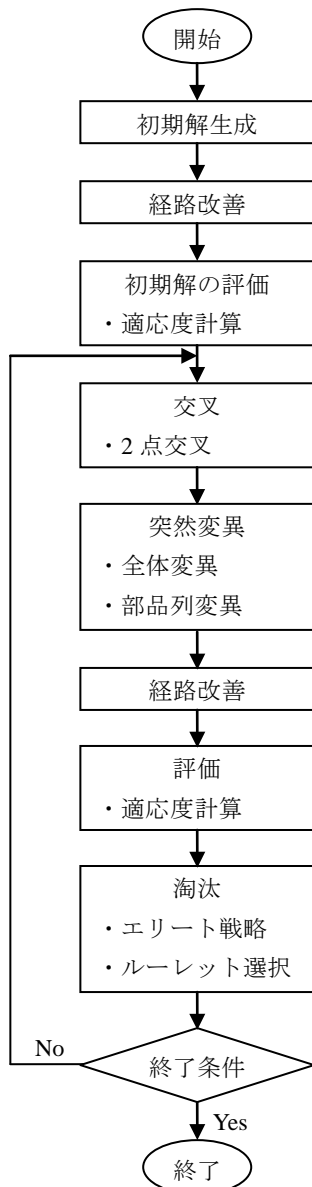


図 2 提案アルゴリズム

なお、部品種類が C_i である各部品にはそれぞれ $c_{i,1}, \dots, c_{i,n(i)}$ と名前がつけられているものとする。ここで $n(i)$ とは、一枚の基板に装着される部品種類 C_i である部品の数である。

並べられた部品を先頭からヘッドのノズル数毎で区切ると、部品のターン割当てに対応する。部品を吸着しないノズルには部品の代わりに記号 E を挿入している。また、ターン内の部品の並び順は部品の装着順序を表すことにする。

従って、図 3 に示す遺伝子が表す解は、ターン 1 が部品装着機 1 の 1 ターン目に割当てられ、部品 $c_{1,1}, c_{1,2}, c_{2,1}$ をノズル $N_{1,2}, N_{1,2}, N_{2,3}$ にそれぞれ吸着し、この順序で基板に装着することを表す。同様に、ターン 2 は部品装着機 1 の 2 ターン目に割当てられ、部品 $c_{1,3}, c_{2,2}, c_{1,4}$ をノズル $N_{1,2}, N_{2,3}, N_{1,2}$ にそれぞれ吸着し、この順序で装着を行う。ターン 3、ターン 4 は部品装着機 2 の 1 ターン目、2 ターン目に割当てられており、それぞれ部品 $c_{2,3}, c_{3,2}$ をノズル $N_{1,2}, N_{2,3}$ に、

部品 $c_{3,2}, c_{3,3}$ をノズル $N_{2,3}, N_{2,3}$ に吸着し、この順序で装着する。

部品装着機 1						部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3			ターン 4		
$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$
$c_{1,1}$	$c_{1,2}$	$c_{2,1}$	$c_{1,3}$	$c_{2,2}$	$c_{1,4}$	$c_{2,3}$	E_1	$c_{3,1}$	$c_{3,2}$	E_2	$c_{3,3}$

図 3 解の遺伝子

3.2 適応度

解の評価値はボトルネックとなる部品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、ボトルネックとなる部品装着機以外の部品装着機については考慮されないこととなる。しかしながら、ボトルネックとなった部品装着機以外の部品装着機の経路長も、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、提案手法では戸崎らの手法と同様に、ボトルネックとなる部品装着機のヘッドの移動距離とは別に、すべての部品装着機のヘッドの総移動距離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る部品装着機のヘッドの移動距離 z と、全ての装着機のヘッドの移動距離 L を足し合せ、2 乗でスケールした値の逆数に基板の面積 S を乗じたものとする。式(1)に適応度 f の算出式を示す。

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

3.3 初期解生成

提案アルゴリズムでは、以下の手順に従い、事前に定めた個体数分の初期解を生成する：

- (1) すべての部品装着機のターン数を 0 とする；
- (2) ノズルに割り当てられていない部品をランダムに 1 つ選ぶ；
- (3) 選ばれた部品を割当てるノズルとターンをランダムに選択する。ただし、ノズルはその部品を吸着可能であり、部品が割当てられていないターンが存在するものに限る。条件を満たすノズルが存在しない場合は、その部品を装着可能なノズルを持つ部品装着機の中で、最もターン数の少ない部品装着機のターン数を 1 つ増やし、そのターンのノズルを選択する。
- (4) ノズルに割り当てられていない部品があれば(2)へ戻る。

3.4 経路改善

初期解や、交叉、突然変異で生成される個体に対して、それぞれ局所探索法を基にした改善を行うことで解の精度を向上させる。経路改善の手順を以下に示す：

次の(1)と(2)の操作を、どちらかで改善が行われなくなるまで、交互に繰り返す。ただし、どちらの操作も少なくとも

も1回は行う。

- (1) 各ターン内での装着順序を 2-opt 近傍を用いた局所探索法で最適化する；
- (2) 各部品装着機内における部品のターン割当てを 2-swap 近傍を用いた局所探索法で最適化する。ただし、交換される部品対は交換後も部品とノズルの組み合わせの制約を満たすものに限ることにする。なお、装着する部品が1つもなくなったターンがあれば、そのターンを削除する。

3.5 交叉

適度に比例した確率でランダムに選択された2つの親個体から2点交叉を用いて各ターンにおける部品の割り当てを交換し、子個体を生成する。選択された2つの親個体は部品装着機のターン数がそれぞれ異なるため遺伝子型が異なるが、それぞれの部品装着機においてターン数が少ない方の個体の遺伝子に何も装着しないターンを一時的に追加することで、遺伝子型が同じになるようにする。

この交叉の方法で生成された子の遺伝子には、複数のノズルに割当てられる部品や、どのノズルにも割り当てられない部品が生じることがある。この場合、生成された遺伝子が表現する解は非許容解となってしまうため、複数のノズルに割当てられている部品は、割当てられているノズルの内のどれか1つのノズルをランダムに選び、このノズルのみ割当てられるように修正する。そして、どのノズルにも割当てられていない部品に対しては、3.3 初期解生成方法の手順(2)からの操作と同様の操作を行うことで再割当てを行う。

以上の操作の後、生成された子個体に何も装着しないターンがあった場合は、そのターンを削除する。

例えば、図 4(a), (b)に示す2つの親個体 1, 2 の遺伝子を用いて子個体を生成する場合には、最初に、ターン数を揃えるため親個体 1 には部品装着機 2 へ1ターン、親個体 2 には部品装着機 1 へ1ターン、それぞれ何も装着しないターンを追加する必要がある。図 4(c), (d)に、親個体 1, 2 の遺伝子にそれぞれ何も装着しないターンを加えた遺伝子を示す。2点交叉の点としてターン 2 とターン 3 の間、ターン 3 とターン 4 の間の2点が選ばれたときに生成される遺伝子を図 4(e)に示す。このとき、部品 $c_{1,3}$, $c_{2,1}$, $c_{2,2}$, $c_{2,3}$ が重複し、部品 $c_{1,1}$ がどのノズルにも割当てられていないため、この遺伝子が表す解は非許容解となる。そこでターン 1 の部品 $c_{1,3}$ 、ターン 2 の部品 $c_{2,2}$, $c_{2,3}$ 、ターン 4 の部品 $c_{2,1}$ を、それぞれ割当てから外し、また部品 $c_{1,1}$ を装着可能で部品を装着しないノズルであるターン 2 の $N_{1,2}$ に部品 $c_{1,1}$ を割当てて。以上の操作により得られた個体の遺伝子を図 4(f)に示す。

部品装着機 1						部品装着機 2		
ターン 1			ターン 2			ターン 3		
$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$
$c_{1,1}$	$c_{1,2}$	$c_{3,1}$	$c_{2,1}$	$c_{2,2}$	$c_{2,3}$	$c_{3,2}$	$c_{3,3}$	$c_{1,3}$

(a) 親個体 1 の遺伝子

部品装着機 1			部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3		
$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$
$c_{1,2}$	$c_{1,3}$	$c_{2,2}$	$c_{1,1}$	$c_{3,2}$	$c_{3,3}$	$c_{2,3}$	$c_{3,1}$	$c_{2,1}$

(b) 親個体 2 の遺伝子

部品装着機 1						部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3			ターン 4		
$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$
$c_{1,1}$	$c_{1,2}$	$c_{3,1}$	$c_{2,1}$	$c_{2,2}$	$c_{2,3}$	$c_{3,2}$	$c_{3,3}$	$c_{1,3}$	E_1	E_2	E_3

(c) (a)の遺伝子に

何も装着しないターンを追加した遺伝子

部品装着機 1						部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3			ターン 4		
$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$
$c_{1,2}$	$c_{1,3}$	$c_{2,2}$	E_1	E_2	E_3	$c_{1,1}$	$c_{3,2}$	$c_{3,3}$	$c_{2,3}$	$c_{3,1}$	$c_{2,1}$

(d) (b)の遺伝子に

何も装着しないターンを追加した遺伝子

部品装着機 1						部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3			ターン 4		
$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$
$c_{1,2}$	$c_{1,3}$	$c_{2,2}$	$c_{1,1}$	$c_{2,2}$	$c_{2,3}$	$c_{3,2}$	$c_{3,3}$	$c_{1,3}$	$c_{2,3}$	$c_{3,1}$	$c_{2,1}$

(e) (c), (d)の2個体から

2点交叉により生成された遺伝子

部品装着機 1						部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3			ターン 4		
$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$
$c_{1,2}$	E_1	$c_{2,2}$	$c_{2,1}$	$c_{1,1}$	E_2	$c_{3,2}$	$c_{3,3}$	$c_{1,3}$	$c_{2,3}$	$c_{3,1}$	E_3

(f) (e)の遺伝子に対して

再割当てを行って得られる遺伝子

図 4 提案手法で用いた2点交叉の様子

3.6 突然変異

提案アルゴリズムでは遺伝的アルゴリズムの突然変異

として、全体変異、部品列変異、ノズル列変異の3種類を用いた突然変異個体をそれぞれ生成する。突然変異を行う個体は、親世代の個体からランダムに選択される。

3.6.1 全体変異

全体変異では、選ばれた個体の遺伝子の部品の順列からランダムに互いに独立な部分列を2つ選び、交換を行う。この操作ではノズルが装着不能な部品と組合わさることがあるため、その場合には装着不能なノズルと組合わされている部品を割当てから外し、3.3 初期解生成方法の手順(2)からの操作と同様の操作を行うことで再割当てを行う。以上の操作の後、生成された遺伝子に何も装着しないターンがあった場合は、そのターンを削除する。

例えば、図 5(a)に示す個体の遺伝子の部品の順列から部分列として $\{c_{2,1}, c_{1,3}, c_{2,2}\}$ と $\{c_{3,1}, c_{3,2}, E_3\}$ が選ばれた場合、これらの部分列を交換して得られる遺伝子を図 5(b)に示す。この遺伝子が表す解は、部品 $c_{1,3}, c_{3,2}$ がそれぞれ吸着不能なノズルに割当てられているため非許容解である。そこでそれぞれ部品 $c_{1,3}, c_{3,2}$ を割当てから外し、部品 $c_{1,3}$ をターン2のノズル $N_{1,2}$ に、部品 $c_{3,2}$ をターン2のノズル $N_{2,3}$ に、それぞれ再割当てを行うことで得られる遺伝子を図 5(c)に示す。

部品装着機 1						部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3			ターン 4		
$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$
$c_{1,1}$	$c_{1,2}$	$c_{2,1}$	$c_{1,3}$	$c_{2,2}$	E_1	$c_{2,3}$	E_2	$c_{3,1}$	$c_{3,2}$	E_3	$c_{3,3}$

(a) 元となる遺伝子

部品装着機 1						部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3			ターン 4		
$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$
$c_{1,1}$	$c_{1,2}$	$c_{3,1}$	$c_{3,2}$	E_3	E_1	$c_{2,3}$	E_2	$c_{2,1}$	$c_{1,3}$	$c_{2,2}$	$c_{3,3}$

(b) (a)の遺伝子の部品の順列の2つの部分列を交換して得られる遺伝子

部品装着機 1						部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3			ターン 4		
$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$
$c_{1,1}$	$c_{1,2}$	$c_{3,1}$	E_1	$c_{3,2}$	$c_{1,3}$	$c_{2,3}$	E_2	$c_{2,1}$	E_3	$c_{2,2}$	$c_{3,3}$

(c) (b)の遺伝子に対して再割当てを行って得られる遺伝子
 図 5 提案手法で用いた全体変異の様子

3.6.2 部品列変異

部品列変異では、選ばれた個体の遺伝子の部品の順列からいずれかの部品種類だけを抜き出し、新たに部品の順列を作成する。そして、この順列の中からランダムに選んだ

2つの部分列を交換し、これを元の遺伝子へ戻す。なお、抜き出した列はすべて同一の部品種類であるため、ノズルと組合わされる部品が変わっても、ノズルとの組み合わせの制約は満たされていることに注意されたい。

例えば、図 6(a)に示す個体の遺伝子から部品種類 C_1 に関する部品列変異を行う場合、部品種類 C_1 である部品を抜き出して得られる部品の順列を図 6(b)に示す。ここで部分列として $\{c_{1,2}\}$ と $\{c_{1,4}\}$ が選ばれ、交換された順列を図 6(c)に示す。この順列を元の個体の遺伝子に戻すことで得られる遺伝子を図 6(d)に示す。

部品装着機 1						部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3			ターン 4		
$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$
$c_{1,1}$	$c_{1,2}$	$c_{2,1}$	$c_{1,3}$	$c_{2,2}$	$c_{1,4}$	$c_{2,3}$	E_1	$c_{3,1}$	$c_{3,2}$	E_2	$c_{3,3}$

(a) 元の個体の遺伝子

$c_{1,1}$	$c_{1,2}$	$c_{1,3}$	$c_{1,4}$
-----------	-----------	-----------	-----------

(b) (a)の遺伝子から

部品種類 C_1 だけを抜き出して得られる部品の順列

$c_{1,1}$	$c_{1,4}$	$c_{1,3}$	$c_{1,2}$
-----------	-----------	-----------	-----------

(c) (b)の順列の2つの部分列を交換して得られる順列

部品装着機 1						部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3			ターン 4		
$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$
$c_{1,1}$	$c_{1,4}$	$c_{2,1}$	$c_{1,3}$	$c_{2,2}$	$c_{1,2}$	$c_{2,3}$	E_1	$c_{3,1}$	$c_{3,2}$	E_2	$c_{3,3}$

(d) (c)の順列を(a)の遺伝子に戻して得られる遺伝子
 図 6 部品列変異の様子

3.6.3 ノズル列変異

ノズル列変異では、選ばれた個体からノズル種類を1つ選び、そのノズル種類と組合わされた部品のみを抜き出し、新たに部品の順列を作成する。そして、この順列の中からランダムに選んだ2つの部分列を交換し、元の順列に戻す。抜き出した部品の順列のノズル種類は同一のものであるため、部分列の交換後もノズルと部品の組み合わせの制約は満たされていることに注意されたい。これらの操作の後、何も装着しないターンが生成されたときは、そのターンを削除する。

例えば、図 7(a)に示す親個体の遺伝子から子個体の遺伝子を生成する場合、最初に、親個体からノズル $N_{1,2}$ に関するノズル列変異を行う場合、ノズル $N_{1,2}$ に割当てられた部

品の順列を図 7(b)に示す。ここで部分列として $\{c_{1,3}, c_{2,3}\}$ と $\{E_2, E_3\}$ が選ばれ、交換された順列を図 7(c)に示す。この順列を元の個体の遺伝子に戻すことで得られる遺伝子を図 7(d)に示す。この遺伝子のターン 2 は何も装着しないターンであるため削除することで得られる遺伝子を図 7(e)に示す。

部品装着機 1						部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3			ターン 4		
$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$
$c_{1,1}$	$c_{1,2}$	$c_{2,1}$	$c_{1,3}$	E_1	$c_{2,3}$	E_2	$c_{2,1}$	$c_{3,1}$	$c_{3,2}$	E_3	$c_{3,3}$

(a) 元の個体の遺伝子

$c_{1,1}$	$c_{1,2}$	$c_{1,3}$	$c_{2,3}$	E_2	E_3
-----------	-----------	-----------	-----------	-------	-------

(b) (a)の遺伝子からノズル $N_{1,2}$ に

割当てられた部品だけを抜き出して得られる順列

$c_{1,1}$	$c_{1,2}$	E_2	E_3	$c_{1,3}$	$c_{2,3}$
-----------	-----------	-------	-------	-----------	-----------

(c) (b)の順列の2つの部分列を交換して得られる順列

部品装着機 1						部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3			ターン 4		
$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$
$c_{1,1}$	$c_{1,2}$	$c_{2,1}$	E_2	E_1	E_3	$c_{1,3}$	$c_{2,1}$	$c_{3,1}$	$c_{3,2}$	$c_{2,3}$	$c_{3,3}$

(d) (c)の順列を(a)の遺伝子に戻して得られる遺伝子

部品装着機 1						部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3			ターン 4		
$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$
$c_{1,1}$	$c_{1,2}$	$c_{2,1}$	E_2	E_1	E_3	$c_{1,3}$	$c_{2,1}$	$c_{3,1}$	$c_{3,2}$	$c_{2,3}$	$c_{3,3}$

(e) (d)の遺伝子から

何も装着しないターンを削除して得られる遺伝子

図 7 ノズル列変異の様子

3.7 淘汰

戸崎らの手法と同様に、次世代はエリート戦略、適応度に比例した重み付けによるルーレット選択により、それぞれ決定する。

4. 計算機実験

提案手法の有効性を評価するために計算機実験を行った。実験環境は CPU が Intel Core i7-2600 3.40GHz、メモリが 2.00GB、言語は C++を用いた。

実験に用いたインスタンスは現実に用いられている部品

装着機ラインや実在する基板データを参考にして設定した。ラインを構成する部品装着機の台数、各部品装着機のノズル構成、ノズル・部品の割当ての制約、基板サイズ、基板上に装着する各部品種類の点数をそれぞれ表 1 に示す。なお、部品供給部は電子基板から 300mm 離れているものとし、各部品を装着する位置は基板上からランダムに設定した。提案アルゴリズムの各パラメータは予備実験により適切に設定し、計算時間は解が十分収束するまでの時間とした。ただし、ある程度、実用に耐えうる計算時間を考慮し、収束が不十分な場合でも約 5 時間で探索を打ち切った。比較対象である戸崎らの手法は、各インスタンスのノズルと部品の制約を削除した問題として解いていることに注意されたい。

表 2 に各インスタンスについて提案手法と戸崎らの手法でそれぞれ得られた解の評価値と計算時間を示す。インスタンス 1 のように、提案手法と戸崎らの手法でそれぞれ得られた解にほとんど差が見られない場合もあるが、最大で 10% 程度、戸崎らの手法に比べて解の悪化が見られた。

解の悪化がアルゴリズムの性能差によるものか、あるいはノズルと部品の制約の有無によるものかを調べるため、提案手法と戸崎らの手法で最も gap の大きかったインスタンス 3 を基に、部品種類数を減らすことで制約を緩和させたインスタンスを新たに 5 種類作成し、それぞれに対して計算機実験を行った。新たに作成したインスタンスの各部品装着機のノズル構成、ノズル・部品の割当ての制約を表 3 に示す。インスタンス 3-5 はノズルと部品の制約を完全に削除しているため、戸崎らの手法が扱った問題と全く同じ問題となっている。

図 8 に、インスタンス 3 と、新たに作成した各インスタンスをそれぞれ提案アルゴリズムで計算したときの計算時間と評価値の関係を示す。制約を緩和したインスタンスほど、戸崎らの手法で得られた評価値に近い値を得ていることが分かる。特に、インスタンス 3-5 については、提案手法の方がやや収束が遅いものの、最終的な評価値は 4106.22 となり、戸崎らの手法で得られた評価値との gap はわずか 0.24% であった。従って、表 2 戸崎手法と提案手法の比較結果で見られた解の悪化は、主にノズル・部品の割当ての制約によるものであり、提案手法の探索効率自体は戸崎らの手法のものと同じと考えられる。

5. まとめ

本論文では、多機能型部品装着機のノズルの部品割当てに制約がある場合の電子基板の生産ラインにおけるラインバランス問題に対して、従来手法を拡張したヒューリスティックな解法を提案した。

また、提案手法はノズル・部品の割当ての制約を考慮しているにも関わらず、従来手法とほぼ同程度の探索効率をもつことを、計算機実験によって確認した。

表 1 実験に用いたインスタンス

#	部品装着機の台数	部品装着機毎のノズル数	ノズルの種類×本数	基板サイズ (x幅×y幅) [mm ²]	部品の種類×個数	総部品数
1	4	8	$N_{1,2} \times 8, N_{2,3} \times 24$	280×122	$C_1 \times 4, C_2 \times 25, C_3 \times 39$	68
2	6	12	$N_{1,2} \times 36, N_{2,3} \times 36$	280×122	$C_1 \times 79, C_2 \times 16, C_3 \times 52$	147
3	4	8	$N_{1,2} \times 8, N_{2,3} \times 8, N_{4,5} \times 8, N_{5,6} \times 8$	98.72×133.29	$C_1 \times 24, C_2 \times 20, C_3 \times 40, C_4 \times 44, C_5 \times 8, C_6 \times 36$	172
4	4	8	$N_{1,2} \times 4, N_{2,4} \times 3, N_{4,5} \times 4, N_{6,6} \times 1, N_{7,7} \times 20$	211.5×114.9	$C_1 \times 4, C_2 \times 68, C_3 \times 8, C_4 \times 16, C_5 \times 32, C_6 \times 8, C_7 \times 253$	389
5	6	12	$N_{1,1} \times 24, N_{2,2} \times 48$	211.5×114.9	$C_1 \times 244, C_2 \times 437$	681

表 2 戸崎らの手法と提案手法の比較結果

#	戸崎らの手法[3]		提案手法		評価値 gap[%]
	探索時間[s]	評価値	探索時間[s]	評価値	
1	1109.17	2005.55	1110.01	2007.79	0.11
2	4845.90	1971.96	4862.52	2116.87	7.35
3	18004.93	4106.22	17993.47	4495.53	9.48
4	18004.02	9026.96	17974.53	9399.00	4.12
5	18007.86	7484.24	18008.47	7986.03	6.70

表 3 インスタンス 3 を緩和させたインスタンス

#	ノズルの種類×本数	部品の種類×部品数
3-1	$N_{1,2} \times 8, N_{2,3} \times 8, N_{4,5} \times 8, N_{5,5} \times 8$	$C_1 \times 24, C_2 \times 20, C_3 \times 40, C_4 \times 44, C_5 \times 44$
3-2	$N_{1,1} \times 8, N_{1,2} \times 8, N_{3,4} \times 8, N_{4,4} \times 8$	$C_1 \times 44, C_2 \times 40, C_3 \times 44, C_4 \times 44$
3-3	$N_{1,1} \times 8, N_{1,2} \times 8, N_{2,3} \times 8, N_{3,3} \times 8$	$C_1 \times 44, C_2 \times 84, C_3 \times 44$
3-4	$N_{1,1} \times 16, N_{1,2} \times 8, N_{2,2} \times 8$	$C_1 \times 128, C_2 \times 44$
3-5	$N_{1,1} \times 24$	$C_1 \times 172$

今後の課題として、以下のことが挙げられる：

- 計算速度の高速化；
- ヘッド上の各ノズル間の距離，吸着動作の考慮；
- 部品装着機の性能が異なる場合への適用。

また、適切なノズル構成を求める問題や、複数種類の基板を生産する場合のラインバランシング問題など、本論文で取り組んだ問題を更に拡張した問題も課題として挙げられる。

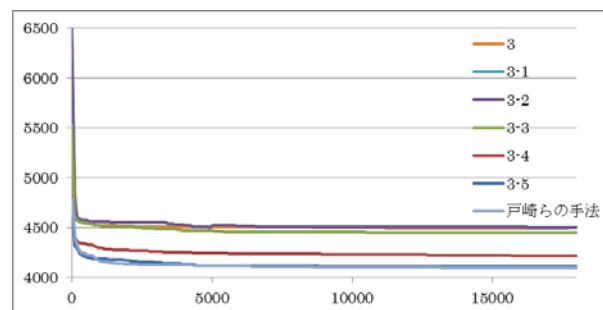


図 8 計算時間と評価値の関係 (インスタンス 3)

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 Gunther, A GA-based solution approach for balancing printed circuit board assembly lines. OR Spectrum (2008) 30:469-491
- 3) Hiroshige Tozaki, Hidenori Ohta, and Mario Nakamori, "A Heuristic Line Balancing Algorithm Accounting for Component Mounting Order," Proc. PDPTA 2011 (held in Las Vegas, Nevada, USA, July 11, 2011), 807-812.
- 4) Hiroaki Konishi, Hidenori Ohta, and Mario Nakamori, "Modeling the Component Pickup and Placement Sequencing Problem with Nozzle Assignment in a Chip Mounting Machine," Proc. PDPTA 2012 (held in Las Vegas, Nevada, USA, July 16, 2012), 724-729